

PREDIT 4/ Groupe 06

Recherche : Enjeux spatiaux, économiques et politiques des scénarios de mobilité durable à l'horizon 2050

**Convention DRI N° 09 MT CV 19
Convention ADEME N°0966C0216**

Rapport de la tâche 6 : Explorer en quoi les nouvelles technologies routières peuvent nous aider à surmonter la crise

Janvier 2012

B. Bougnoux

Enerdata

47, Avenue Alsace-Lorraine
38000 Grenoble
France

www.enerdata.net

s.a.s au capital de 100 000 euros
RCS Grenoble 381 703 859

TABLE DES MATIERES

1. POSTULAT ECONOMIQUE DANS LEQUEL SE SITUE CE RAPPORT	3
2. FILIERE INDUSTRIELLE AUTOUR DU VEHICULE ELECTRIQUE	5
2.1. Présentation du véhicule électrique.....	5
2.2. Le défi à relever : la batterie	9
2.3. La position des industriels français sur ces technologies.....	11
3. FILIERE INDUSTRIELLE AUTOUR DU VEHICULE MCI HYBRIDE.....	15
3.1. Présentation des véhicules MCI hybridés.....	15
3.2. Les défis à relever : le coût de la technologie hybride	17
3.3. La position des industriels français sur ces technologies.....	17
4. FILIERE INDUSTRIELLE SUR LES COMBUSTIBLES (BIOCARBURANTS)	18
4.1. Présentation des biocarburants.....	18
4.2. Les défis à relever : ressource, logistique, conversion.....	19
4.3. La position des industriels français sur ces technologies.....	20
5. SERVICES ECONOMIQUES RENDUS PAR CES FILIERES INDUSTRIELLES	22
5.1. Véhicules électriques et gestion du réseau électrique	22
5.2. Véhicules électriques et collecte de l'électricité renouvelable intermittente.....	24
5.3. Biocarburants et réutilisation des émissions de CO2 des industriels	26
6. IMPACTS ECONOMIQUES EN TERMES D'EMPLOIS.....	27
6.1. Présentation de la problématique	27
6.2. Impact sur la filière énergie	29
6.3. Impact sur la filière automobile	30
6.4. Impacts liés aux retombées de l'industrie sur l'économie	32
6.5. Bilan global en emploi	33
7. ANNEXES	36
7.1. Annexe 1 : Lien statistique entre industrie et développement économique.....	36
7.2. Annexe 2 : Comment remplacer la TIPP ?	37
7.3. Annexe 3 : Quel contenu CO2 du km de la voiture électrique à terme.....	38
7.4. Annexe 4 : Part des énergies fossiles dans notre balance commerciale.....	41

1. Postulat économique dans lequel se situe ce rapport

L'expression « les industries motrices » a été formulée pour la première fois en 1968 par François Perroux, économiste au Collège de France. Aujourd'hui, de plus en plus d'économistes remettent cette thèse au centre du débat et rappellent que la désindustrialisation est la principale cause de nos problèmes économiques actuels.

Loin d'être isolée, cette thèse est relayée par de nombreux économistes tels Elie Cohen, Christian Saint Etienne, Christian de Boissieu, Jean-Hervé Lorenzi, Jean Peyrlevade, Daniel Cohen, Olivier Pastré, Philippe Aghion, Philippe Martin, Jacques Mistral, Nicolas Baverez, Patrick Artus, Nicolas Bouzou, Jean-Louis Levet... Le dernier livre de Patrick Artus et Marie Paule Virard : « *La France sans ses usines* », octobre 2011, est par exemple un fervent plaidoyer pour réindustrialiser la France. Avec de plus en plus d'insistance, de nombreuses voix s'élèvent aujourd'hui pour relancer une politique industrielle en France.

De façon à évaluer l'impact que pourrait avoir l'émergence d'une filière industrielle autour des nouvelles technologies routières, il convient de bien saisir les mécanismes économiques à l'œuvre sur cette notion de réindustrialisation. En quoi l'industrie est effectivement spécifique et doit retenir notre attention dans le débat sur la sortie de crise ? Quelle est cette thèse autour d'une nouvelle politique industrielle ?

L'industrie représente actuellement moins de 13% de l'emploi en France, et cette part diminue régulièrement. Cela peut faire croire que l'industrie est devenue une activité secondaire, face à des services très dynamiques assurant l'essentiel des créations d'emplois. C'est en quelques sortes la thèse de la société post-industrielle, avec l'avènement d'une économie tertiaire qui aurait avantage, selon certains, à se tourner vers le secteur des services hautement qualifiés.

Cette vision est aujourd'hui remise en cause par beaucoup d'économistes. Ces derniers estiment qu'il est illusoire de penser que l'on pourrait tenir notre rang en matière de services à haute valeur ajoutée sans industrie. Peut-on penser par exemple que notre ingénierie technique conserverait à l'export une crédibilité suffisante dans un pays qui n'aurait plus d'usines ?

D'autre part, cette vision élude le fait que l'industrie a des retombées importantes sur les autres secteurs. Il existe en effet un double enjeu qui peut créer une confusion. Si le but est bien, au final, de créer des emplois, la création de richesse présente un objectif intermédiaire primordial qu'il ne faut pas perdre de vue. Or, la création de richesse est en grande partie le fait de l'industrie. C'est notamment l'industrie qui assure 80% de nos exportations et près de 90% des dépenses de R&D des entreprises.

Par la création de richesse qu'elle génère, l'industrie permet donc la création d'emplois dans les services. Mais sans cette création de richesse initiale, ces emplois de service ne seraient pas là. C'est pourquoi, l'industrie est vue comme le principal moteur de l'économie. Il y aurait bien une richesse primaire et une richesse secondaire, la première conditionnant la seconde. Dans cette vision, l'industrie est au cœur du développement économique des territoires.

Le schéma ci-contre, qui retrace le parcours d'un euro sur un territoire, permet de comprendre les mécanismes économiques à l'œuvre. Le premier flux est l'entrée de l'euro sur un territoire, cette entrée est essentiellement le fait de l'industrie qui vend ses produits sur un marché extérieur.

Le deuxième flux est la consommation de cet euro dans l'économie locale, par le biais des ménages et des Collectivités locales. Cette étape permet la création de nombreux emplois, en particulier dans le secteur des services aux ménages.

Lors du troisième flux, l'euro s'échappe du territoire car les acteurs sont libres de leur consommation et en affectent une partie à des produits ou services qui sont produits ailleurs (achats de voiture, tourisme, électroniques, habillement...).

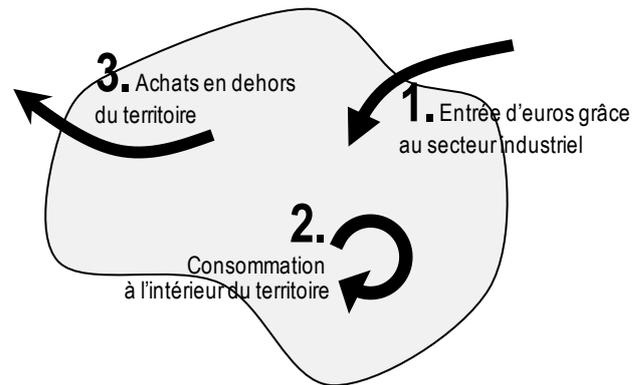
Cette thèse nous dit que si le premier flux fait défaut (exportation), les deux autres flux ne peuvent exister¹. Par le revenu régulier apporté au territoire, la présence d'une industrie maintient la solvabilité d'un ensemble de services aux ménages et les emplois de proximité qui y sont liés. Les autres secteurs ne peuvent se substituer à l'industrie pour équilibrer notre solde extérieur. Au niveau national, les exportations dans les secteurs des services aux entreprises, de l'agriculture et du tourisme représentent respectivement 26 Md€, 30 Md€, et 40 Md€, ce qui est modeste à comparer aux 390 Md€ de l'industrie.

En représentant près de 80% du total des exportations françaises, l'industrie est le principal contributeur à l'équilibre de notre balance commerciale. C'est par ce mécanisme que l'industrie joue un rôle essentiel dans notre économie, et nous permet d'accéder à un niveau de vie élevé générant la création de nombreux emplois dans les services aux ménages. En somme, l'industrie est à la base de notre prospérité. En annexe, nous présentons des graphiques illustrant le lien de causalité entre développement industriel et développement économique. Il est notamment indiqué qu'il existe un décalage de temps entre les deux, ce qui semble prouver que l'industrie impulse la dynamique économique.

Plusieurs économistes lient les problèmes actuels de certaines économies d'Europe du sud à la désindustrialisation. L'Espagne aurait par exemple fait un certain nombre d'erreurs stratégiques au cours des 10 ou 15 dernières années en misant trop sur le secteur du BTP. L'Espagne a construit des centaines de milliers de logements, des bâtiments de prestige², s'est dotée d'infrastructures de transport³. Ces investissements ont dynamisé l'économie de façon temporaire, sans effet pérenne. Une fois les travaux finis, le soufflé retombe. L'effet de ces investissements sur la compétitivité du pays et sa capacité à exporter a été faible. Si le même argent avait été mis pour développer des filières industrielles (via par exemple la R&D), l'économie espagnole serait certainement en meilleure forme. La stratégie allemande qui consacre 2,8% de son PIB à la recherche et développement semble avoir été plus avisée que la stratégie espagnole qui en consacre 1,4%. Aussi, le bon slogan pour la croissance ne serait pas « Quand le BTP va, tout va » mais plutôt « Pas d'avenir sans industrie ».

Les nouvelles technologies routières peuvent offrir à la France de nouvelles opportunités d'industrialisation. Ce rapport vise à décrire quelles sont ces nouvelles technologies et donne des informations sur le positionnement de la France dans la compétition qui s'engage. Un chiffrage sur les retombées économiques en emploi de ces nouvelles technologies est proposé dans le dernier chapitre.

Le parcours des Euros sur le territoire
(s'il n'y pas 1 pour compenser 3, il n'y a pas 2)



¹ Sauf à envisager des territoires « sous perfusion ».

² Voir l'article du journal *Le Monde* du 21 novembre 2011. L'article dresse une liste des bâtiments de prestige construits par l'Espagne au cours de ces dix dernières années (centres culturels, aéroports, bibliothèques...).

³ L'Espagne compte aujourd'hui un réseau TGV et un réseau autoroutier plus important que celui de la France.

2. Filière industrielle autour du véhicule électrique

2.1. Présentation du véhicule électrique

Les véhicules électriques utilisent un moteur électrique et des batteries, au lieu d'un moteur à combustion interne et des carburants pétroliers. Aujourd'hui cette technologie est en émergence, le nombre de véhicules électriques circulant dans le monde reste négligeable. Toutefois, certains constructeurs portent actuellement un intérêt important au véhicule électrique.

L'objectif que s'est fixé le gouvernement français à l'horizon 2020 est d'avoir deux millions de véhicules électriques et hybrides dans le parc français, soit environ 7% des véhicules en circulation. En 2011, une commande groupée de l'Etat, des collectivités locales et des entreprises publiques a permis d'acheter 18.700 véhicules électriques. La Poste sera le principal bénéficiaire de cette commande. Quelques entreprises privées se sont aussi associées à la démarche. Les deux constructeurs nationaux ont remporté le marché, les livraisons de véhicules s'étaleront jusqu'en 2015. Renault livrera 15.700 véhicules Kangoo et PSA livrera 3.000 véhicules Ion.

2.1.1. Un modèle économique spécifique au véhicule électrique

Un véhicule électrique se caractérise par un achat important au départ (investissement), mais ensuite par des achats d'énergie modérés et des coûts d'entretien qui pourraient également être plus faibles (pas de vidange notamment). Les promoteurs du véhicule électrique rappellent que le plein coûte environ 2 euros, ce qui est effectivement attractif, même s'il faut préciser que le plein en question permet de parcourir environ 200 km et non 800 km. Le différentiel de coût avec un plein d'essence s'explique aussi en partie par le fait que l'électricité n'est pas assujettie à la taxe intérieure sur les produits pétroliers.

L'investissement important à réaliser au départ est un frein au développement du véhicule électrique. Les ménages ont en effet tendance à privilégier des solutions où l'investissement est modeste même si cela génère des coûts de fonctionnement plus élevés, que l'inverse. Les constructeurs automobiles ont mis au point des formules marketing permettant de surmonter ce problème, avec notamment la location des batteries.

Ainsi Renault propose un véhicule électrique ayant un coût similaire à celui d'un véhicule thermique, avec une location de la batterie aux alentours de 100 € par mois, incluant la fourniture de l'énergie. Dans ce modèle, le véhicule électrique peut retrouver une certaine attractivité car la location représente, peu ou prou, ce qu'on dépense en carburant.

Une littérature importante existe sur la question de la rentabilité du véhicule électrique par rapport au véhicule thermique. Il n'y a pas vraiment de consensus dans ces analyses, ce qui est compréhensible car une incertitude forte demeure sur l'évolution du prix des carburants pétroliers, variable qui reste clé dans ce type d'analyse.

Sur le plan méthodologique, la plupart des comparaisons se contentent d'ajouter au véhicule électrique le coût d'un pack batterie. Dans l'analyse réalisée par le CAS par exemple, il est comparé une Renault Fluence électrique à une Renault Fluence avec moteur thermique, et il est dit que la différence de coût à l'achat correspond au pack batterie. Cette méthode est discutable puisque la différence entre les deux véhicules ne se limite pas aux seules batteries.

Si on met la question des batteries de côté, le véhicule électrique a un fonctionnement plus simple que celui d'un véhicule thermique à explosion. Ainsi, dans un véhicule électrique, l'énergie est directement transmise au moteur par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur ce qui entraîne moins de composants que ceux à prévoir dans un véhicule

thermique (boîte de vitesse, courroie de transmission, système d'échappement, insonorisation...).

Il est toutefois difficile d'estimer le gain financier résultant de l'architecture plus simple du véhicule électrique par rapport au véhicule thermique (hors batterie). En réalité, tant que le véhicule électrique n'aura pas été produit en série, il sera difficile de connaître son coût exact.

Sur ce point, les constructeurs automobiles ont optimisé le moteur thermique pour qu'il fonctionne environ 20.000 heures. Or aujourd'hui, les moteurs électriques proposés sur le marché sont plus chers car ils ont été conçus pour les applications industrielles ou des applications pour le transport collectif dans lesquelles leur résistance doit être plus élevée, de l'ordre de 100.000 heures voire davantage. Il y aura donc une nécessaire adaptation, entre le moteur électrique actuel et un moteur électrique optimisé répondant exactement aux spécifications demandées par les constructeurs automobiles.

2.1.2. Le fonctionnement des auxiliaires et notamment le chauffage

Le rendement des moteurs électriques constitue une caractéristique fondamentale. Sur une partie très importante du champ d'utilisation couple / régime, le rendement de transformation de l'énergie électrique en travail mécanique dépasse les 90%. Ces rendements sont au moins trois fois supérieurs à ceux des moteurs thermiques.

Ces hauts rendements posent paradoxalement un problème pour le chauffage de l'habitacle car le moteur du véhicule électrique ne dégage presque pas de chaleur. Cela devrait entraîner des développements technologiques spécifiques aux véhicules électriques. La thermique de l'habitacle pourrait notamment utiliser une pompe à chaleur, afin d'éviter une réduction trop forte de l'autonomie du véhicule électrique.

Si le rendement d'utilisation de l'énergie est très élevé en traction électrique, il ne faut pas oublier que la production de l'électricité, sa distribution et son stockage avant d'arriver au moteur, se caractérisent par une cascade de rendements de l'ordre de 30 à 40% par rapport à l'énergie primaire. Cette valeur est à comparer aux 85-90% d'efficacité pour le traitement des énergies liquides issues du pétrole.

2.1.3. La faible autonomie du véhicule électrique

Le point faible du véhicule électrique reste sa faible autonomie. Beaucoup de constructeurs annoncent des chiffres de l'ordre de 150 à 200 km en cycle normalisé. Cette autonomie est en réalité très dépendante des conditions d'utilisation du véhicule et notamment de la vitesse à laquelle il circule. Ainsi, un véhicule électrique roulant à 50 km/h en moyenne et disposant d'une autonomie de 200 km, aura, s'il roule à 130 km/h en moyenne, une autonomie qui chute à 70 km¹.

Même si le véhicule électrique est essentiellement conçu pour l'urbain, cette réduction importante de l'autonomie sur autoroute reste un gros problème. Seuls les ménages possédant deux voitures pourraient alors être tentés par l'achat d'un véhicule électrique, celui-ci jouant le rôle de deuxième voiture du foyer.

Aujourd'hui, il existe toutefois des solutions permettant d'augmenter l'autonomie du véhicule électrique de façon à le rendre compatible pour des trajets plus longs sur autoroute. Ces solutions sont essentiellement au nombre de trois.

¹ Voir les calculs de André Douaud dans les cahiers de l'OVE « Automobiles et énergies, comprendre la voiture propre d'aujourd'hui et de demain », octobre 2010, page 69.

- Le changement du pack batterie dans les stations-service

C'est le modèle imaginé par Renault-Nissan pour Israël dans son projet « Better place ». Plutôt que d'appartenir au propriétaire de la voiture, les batteries sont louées et le contrat de location prévoit de pouvoir changer le pack batterie dans une station-service en cas de besoin. Le changement d'un pack batterie prend moins de cinq minutes, soit à peu près autant que le remplissage de son réservoir d'essence.

Cette solution est intéressante mais il est nécessaire d'avoir une bonne couverture géographique des stations-service proposant ce service, ce qui est plus facile à réaliser dans un pays de taille modeste comme Israël qu'en France. Cette technologie est également coûteuse. Le coût d'une station est évalué à 1,2 million d'euros et le fournisseur devra disposer d'un stock de batteries important, immobilisé pendant les recharges et donc de capacités financières conséquentes. Renault prévoirait l'installation de telles stations en Israël, au Danemark et en Australie.

Autre inconvénient, dans la mesure où l'autonomie d'un véhicule électrique sur autoroute pourrait se limiter à une petite centaine de kilomètres, cette solution impose de s'arrêter toutes les 45 minutes environ pour changer son pack batterie. Cela peut être acceptable pour un trajet de deux heures, si le trajet est plus conséquent, la perte de temps liée aux changements de pack batterie peut devenir pénalisante.

- La recharge rapide des batteries

Certaines technologies sont actuellement développées pour permettre une recharge rapide des batteries. Au lieu de prendre plusieurs heures, il pourrait être possible de recharger partiellement ses batteries en une vingtaine de minutes, le temps d'un arrêt sur autoroute. Toutefois, la charge rapide détériore les performances des batteries, aussi il est déconseillé d'y recourir trop souvent. Mais cette solution pourrait justement s'accommoder avec le fait que les déplacements longs sont précisément rares. L'inconvénient indiqué pour le changement du pack batterie (fréquence des arrêts) se pose également pour la recharge rapide.

- Le range extender

Le range-extender est un moteur d'appoint produisant de l'électricité que l'on utilise lors des déplacements longs. L'électricité produite va directement au moteur et soulage ainsi les batteries. L'autonomie de la voiture électrique peut ainsi passer de 200 km à 500 km environ.

Le range extender utilise une énergie liquide ou gazeuse plus dense que les batteries. Il peut être un groupe électrogène fonctionnant avec des biocarburants ou une pile à combustible fonctionnant avec de l'hydrogène. Différentes configurations de range-extender sont possibles, avec des range-extender fixés au véhicule ou au contraire amovibles¹.

Les constructeurs automobiles semblent s'intéresser de plus en plus au range-extender. Ce dernier contribue en effet à résoudre le problème de la demande en énergie pour les fonctions auxiliaires, la thermique de l'habitacle en particulier. Il permet également la mutation entre le véhicule 100% électrique spécifiquement urbain et un véhicule hybride polyvalent. Cela ouvre notamment le champ à de nouvelles motorisations thermiques très compactes à haut rendement, avec un cahier des charges différent de celui des motorisations de propulsion actuelles.

La Chevrolet Volt a été une des premières voitures électriques équipée en série d'un range-extender. La voiture a été lancée aux Etats-Unis en décembre 2010 et le sera en France à la fin de l'année 2011. La voiture possède une autonomie en électrique pur limitée (entre 40 km

¹ Une vidéo sur internet illustre cette technique : <http://www.youtube.com/watch?v=fN8g3bcU7ZM>

et 80 km) mais grâce à son range-extend, la Chevrolet Volt peut effectuer des trajets de l'ordre de 500 km. La Chevrolet Volt fut nommée « automobile de l'année 2011 » par le magazine américain Motor Trend et elle a obtenu le « Trophée de l'innovation » de l'Automobile Magazine. Toutefois, près d'une année après son lancement, les ventes sont décevantes, le coût élevé de la voiture (40 000 \$) serait dissuasif.

Si le range-extend est une pile à combustible, son coût élevé pourrait mieux s'accommoder d'un modèle économique reposant sur la location plutôt que sur la propriété. Des loueurs de range-extend pourraient s'implanter sur les aires d'autoroutes ou près des péages, et permettre ainsi aux utilisateurs de véhicule électrique d'effectuer de longs trajets. Le client louerait un range-extend au début de son voyage et le rendrait quelques centaines de kilomètres plus loin, sur une autre aire d'autoroute ou à son péage de destination.

Autre solution, des entreprises telles Esso, Total, ou encore Norauto, Feux Vert... pourraient louer des range-extend, ces derniers pouvant être rendus dans n'importe quel autre point du réseau. Ce service pourrait notamment voir le jour pour des trajets en dehors des axes autoroutiers.

2.1.4. Les bornes de recharge sur voie publique

Les bornes de recharge sur voie publique sont souvent évoquées pour accompagner le déploiement des véhicules électriques. Ces bornes permettent au véhicule de retrouver une autonomie pour finir un trajet.

Selon une récente publication du Conseil d'Analyse Stratégique¹, une borne de recharge est actuellement estimée entre 4.000 et 9.000 € l'unité pour des bornes à charge lente (moins de 3 KVA). Ce coût comprend la borne elle-même, ainsi que le génie civil. Les bornes à charge rapide sont plus chères. Le Livre Vert a calculé que « si les frais d'infrastructure de recharge devaient être supportés intégralement par le client final, il faudrait alors leur faire payer pour chaque plein de 25 kWh des prix compris entre 13 € pour une borne à 3 kVA en charge normale, et 36 € pour une charge rapide à 43 kVA, auxquels pourrait s'ajouter le coût de l'électricité estimé à environ 2 € pour ce même plein ». Le Livre Vert conclue « lorsque l'on reporte l'ensemble de ces frais d'infrastructures [bornes de recharge] sur le client final, il apparaît, au moins sur les premières années de démarrage du marché, que les frais d'infrastructures viennent en partie grever la compétitivité du véhicule rechargeable par rapport au véhicule thermique ».

Autre problème des bornes en cas de charge rapide, le rendement énergétique et la batterie elle-même sont dégradés. La charge lente d'une batterie se fait avec un rendement de l'ordre de 93%, soit 7% de perte, la charge rapide se fait avec un rendement nettement inférieur. Il est également connu que la recharge rapide dégrade la batterie, aussi elle doit être faite de façon exceptionnelle ou de façon partielle. Aujourd'hui, se dégage l'idée que la recharge rapide ne devra pas être utilisée pour refaire le plein d'énergie, mais devrait plutôt servir à retrouver quelques kilomètres d'autonomie pour rentrer chez soi (solution de secours).

Ces bornes de recharge sur la voie publique ont donc plusieurs défauts qui pourraient remettre en cause l'équilibre économique du véhicule électrique. Mais l'utilité des bornes de recharge peut elle-même être discutée.

Leur intérêt dépend en réalité de leur lieu d'implantation. Sur autoroute, l'utilité peut être réelle, notamment si le service rendu par le range-extend apparaît moins efficace. Par contre en milieu urbain dense, on peut probablement relativiser l'utilité de ces bornes. Sauf

¹ « Livre vert sur les infrastructures de recharge publiques pour les véhicules décarbonés », Publication du CAS, sous la Présidence de Louis Nègre, sénateur, avril 2011.

exception, une personne habitant en centre-ville n'a pas vocation à être utilisateur de véhicule électrique. Le transport en commun ou les modes de transports doux devraient être les plus répandus à cette échelle.

Le marché de prédilection des voitures électriques concerne des personnes habitants en périphérie de ville (2^{ème} couronne, voire 1^{ère} couronne), dans lesquelles l'offre des transports en commun est limitée. Plus d'un français sur deux habite en maison individuelle, notamment dans ce type d'habitat.

Pour réaliser leur déplacement domicile-travail, ces personnes auront la possibilité de recharger leur véhicule chez eux, dans leur garage ou sur leur parking, en optant pour la recharge lente. Le Livre Vert estime que 90% à 95% de la recharge des véhicules électriques pourrait se faire selon ce mode, sans borne publique.

2.1.1. Le contenu CO2 du véhicule électrique

En 2012, Renault va mettre sur le marché une voiture électrique citadine, la Zoé. Dans la brochure commerciale de ce véhicule, on lit que la Zoé émettra 12 grammes de CO2 par km¹, ce qui est très bas par rapport aux voitures vendues actuellement en France (en moyenne 130 grammes CO2/km). Pour arriver à cette valeur de 12 grammes, Renault a considéré que l'alimentation de la Zoé se ferait par une électricité décarbonée, en particulier d'origine nucléaire.

Aujourd'hui, la France dispose de marges de manœuvre réduites pour augmenter sa production nucléaire. A l'horizon 2020, il est néanmoins possible d'accepter l'idée que les quelques 2 millions de véhicules électriques ou hybrides soient en grande partie alimentés par une énergie nucléaire. En effet, la consommation liée à ces véhicules devrait représenter un faible impact, environ 1% de la production actuelle, et donc alimenter ces véhicules devrait rester de l'ordre du techniquement faisable.

La question se pose davantage pour les années suivantes, à l'horizon de deux ou trois décennies, en supposant une augmentation sensible du nombre de véhicules électriques. A cette échéance, le véhicule électrique pourra-t-il bénéficier d'une électricité en grande partie décarbonée ?

La réponse à cette question dépend évidemment de la politique énergétique du pays. Toutefois, la décision de l'Allemagne de se retirer du nucléaire n'est pas forcément contradictoire avec l'idée d'avoir des véhicules électriques faiblement émetteurs de CO2. Ainsi, un mix électrique composé à l'avenir de 50% de gaz et 50% de renouvelable pourrait permettre d'avoir un véhicule électrique ayant un faible niveau de CO2, de l'ordre de 30 grammes CO2 par km. En annexe, il est expliqué comme on peut arriver à ce résultat.

2.2. Le défi à relever : la batterie

La batterie est le principal défi de la voiture électrique. La batterie pose de nombreux problèmes : le coût, la durée de vie, la vitesse de la recharge, le poids et la densité d'énergie, la disponibilité des matières premières, le recyclage en fin de vie et enfin la sécurité. Malgré ces problèmes, de grands progrès ont été faits ces dernières années sur les batteries. Les différentes générations sont les suivantes :

- Les **batteries au plomb** correspondent à la technologie la plus ancienne des batteries. Elles sont encore largement utilisées dans l'industrie ainsi que dans l'équipement des véhicules automobiles, particulièrement le démarreur électrique, car leur coût est

¹ Ce calcul a été établi par Renault du puits à la roue, il intègre notamment le contenu CO2 lié à la production d'électricité.

compétitif. Ces batteries ne se sont pas imposées pour les voitures électriques du fait de leur mauvais rapport masse/énergie. Ces batteries peuvent également servir à stocker de l'énergie produite par intermittence, comme l'énergie solaire ou éolienne.

- Les **batteries Nickel-Cadmium** (Ni-Cd) sont aujourd'hui relativement dépassées en termes d'autonomie, et ne sont plus vendues dans l'Union européenne suite à une directive européenne interdisant l'utilisation du cadmium dans les accumulateurs portables.
- Les **batteries nickel-hydrure métallique** (Ni-MH) ont été commercialisées pour la première fois en 1989 et présentent une énergie volumique supérieure d'au moins 30% par rapport aux accumulateurs Ni-Cd. Les accumulateurs Ni-MH sont les batteries de prédilection pour les voitures hybrides. La Toyota Prius et la Honda Civic IMA, par exemple, sont équipées de batteries Ni-MH.
- Les **batteries Li-ion** sont celles qui offrent la plus forte énergie spécifique (énergie/masse) et la plus grande densité d'énergie (énergie/volume). Elles se développent actuellement beaucoup dans la plupart des applications nomades, et notamment les voitures. Deux technologies Li-ion sont en concurrence, l'une est basée sur l'oxyde de manganèse, l'autre sur le phosphate de fer¹. Une variante, les batteries au **Lithium-Polymère** (LMP) qui sont notamment en développement chez le groupe français Bolloré. Bolloré équipe les voitures autolib à Paris de ces batteries.

Le tableau suivant récapitule les principales caractéristiques de ces différentes générations de batterie :

Type batterie	Première année de commercialisation	Energie massique en Wh/kg	Energie volumique en Wh/l	Nombre de cycles
Plomb/acide	1870	30 - 40	60 - 75	400 - 800
Ni-Cd	1946	45 - 80	80 - 150	1 500 - 2 000
Ni-MH	1989	60 - 110	220 - 330	800 - 1 000
Li-ion	1991	100 - 250	250 - 620	500 - 1 000

Aujourd'hui une voiture électrique doit embarquer environ 100 kg de batterie au lithium-ion pour parcourir 100 km, quand hier avec les précédentes technologies, il en fallait le double voire le triple. Les batteries au lithium-ion sont actuellement les plus efficaces en terme de compromis poids - puissance - coût.

Le coût des batteries lithium-ion est actuellement le principal obstacle au déploiement du véhicule électrique. Le rapport Syrota² de septembre 2008 donne un historique de la diminution des coûts des batteries lithium-ion, sur la base des prix constatés sur le marché de l'électronique. La diminution du coût a été importante dans la décennie 1990, autour de 8-9% par an. Depuis le début des années 2000, la diminution du coût serait d'environ 4% par an.

L'objectif des constructeurs automobiles est d'atteindre un coût batterie d'environ 250 € par kWh. Ce coût devrait principalement être obtenu par la production de masse avec des

¹ Voir article du journal Le Monde du 29/06/2011.

² « Perspectives concernant le véhicule grand public d'ici 2030 », Conseil Général des Mines et Centre d'Analyse Stratégique, Rapport de la mission présidée par Jean Syrota, Septembre 2008.

processus de production plus automatisés. Selon les données de la littérature, ce coût batterie est actuellement d'environ 500 € par KWh. Toutefois il existe une assez grande incertitude autour de ce chiffre.

Ainsi, le rapport du CAS¹ de juin 2011 donne un coût de la batterie Lithium-Ion plus élevé, autour de 700-800 € par KWh (page 110 et suivantes). Mais un peu plus loin dans le rapport, page 122 et suivantes, le CAS constate que le coût auquel se fournit Renault serait au maximum de 380 €/KWh².

Une incertitude demeure également sur la disponibilité de la ressource lithium. Ce point est controversé, même si un certain nombre d'experts le considèrent comme secondaire. Le lithium est présent principalement au Chili, en Chine, en Argentine et en Australie. Des quantités importantes de lithium seraient également disponibles en Afghanistan.

2.3. La position des industriels français sur ces technologies

2.3.1. Sur l'assemblage et la commercialisation de véhicules électriques

Le groupe Renault-Nissan est probablement l'acteur le plus actif sur le développement des voitures électriques dans le monde. Ces deux entités ont indiqué avoir investi ensemble plus de 4 Md€ pour développer les technologies du véhicule électrique. C'est un effort très conséquent quand on sait que leur budget R&D se monte à environ 5,2 Md€ par an³. Cela signifie que depuis 2007, Renault et Nissan ont consacré presque un quart de leur budget R&D au véhicule électrique.

Renault lancera 4 véhicules électriques au cours des prochains mois : la Fluence (berline), la Kangoo (utilitaire), la Twizy (mini-urbaine) et la Zoé (urbaine). Renault prévoit de vendre 200.000 véhicules électriques dès 2015, dont 150.000 Zoé produites à Flins dans les Yvelines, et 50.000 Fluence, Kangoo et Twizy. La Fluence sera produite également en France à Maubeuge, la Kangoo en Turquie et la Twizy en Espagne. Nissan a lancé la Leaf en 2010 aux Etats-Unis et au Japon. La Leaf est actuellement la voiture électrique phare de Nissan. Pour l'Europe, la Leaf sera fabriquée au Royaume-Uni, et Nissan prévoit d'en vendre 50.000 par an à court terme.

Les principaux concurrents de Renault-Nissan sur le véhicule électrique ne sont pas européens. On trouve Toyota (Japon), Chevrolet (Etats-Unis, groupe General Motors), Mitsubishi (Japon), enfin Byd (Chine). Byd, spécialiste en batterie, est devenu plus récemment constructeur automobile. En 2010, Byd a pris une participation de 18% dans la plus grande mine de Lithium de Chine (Zhabuye Lithium).

En Europe, les autres constructeurs tels Volkswagen, PSA, Fiat, Daimler, BMW ne sont pas absents du véhicule électrique, mais leur ambition semble moins affirmée que celle de Renault. Christian Streiff, ancien Président du Directoire de PSA, déclarait par exemple en octobre 2008 au journal Le Monde : « le véhicule électrique ne représentera que 5 % à 15 % du marché, tandis que l'hybride devrait se situer en revanche entre 10 % et 50 % du marché européen d'ici dix ans ». Volkswagen avait une attitude également assez prudente sur le véhicule électrique, même s'il semble que son positionnement évolue actuellement.

¹ « La voiture de demain, carburant et électricité », Centre d'Analyse Stratégique, Rapport de la mission présidée par Jean Syrota, Juin 2011.

² Pour aboutir à ce chiffre, le CAS procède à un calcul à l'envers. La Renault Fluence est actuellement proposée sur le marché. Ses batteries sont proposées à la location. En appliquant un taux d'actualisation et une certaine durée de vie, on peut estimer une valeur d'actif des batteries. Ce calcul aboutit à un coût batterie pour Renault de 380 €/KWh (hypothèse haute). Le CAS note que « Renault dispose d'un accès à des prix de batteries extrêmement bas, nettement inférieurs à tous ceux que les experts consultés auront communiqués ».

³ Soit environ 1,8 Md€ par an pour Renault et 3,4 Md€ pour Nissan. Source : EU Industrial R&D Investment Scoreboard, 2011.

2.3.2. Sur la fabrication des batteries

La technologie des batteries repose aujourd'hui largement sur des industriels japonais et coréens. Les leaders dans ce domaine sont le japonais NEC Tokin qui fournit Nissan, le coréen LG qui fournit notamment General Motors, le japonais GS Yuasa qui fournit Mitsubishi, et enfin le japonais Panasonic très présent sur le marché des batteries pour véhicules hybrides qui fournit notamment Toyota. La France compte néanmoins un certain nombre d'acteurs importants sur ces technologies et espère pouvoir prendre une place plus importante sur ce marché. Les principaux acteurs français des batteries sont les suivants :

- Renault (Flins, Maubeuge)

Renault souhaite intégrer complètement la filière, c'est-à-dire assembler des véhicules électriques mais aussi être producteur de batteries. Renault a annoncé¹ que son usine de Flins produirait des batteries en 2014. Initialement, cette usine devait commencer à produire des batteries en 2012. Pour justifier ce retard, Renault met en avant la rapidité des progrès en matière de modules de batteries et semble penser qu'il serait préférable d'attendre un peu, plutôt que de lancer la production sur les bases de la technologie existante. Si l'annonce du report a déçu, elle traduit aussi une évolution technologique rapide des batteries, ce qui est une nouvelle plutôt positive.

Renault a confié une partie des recherches sur les batteries au CEA-Liten. Le 24 juin 2010, Renault et le CEA ont signé un accord de recherche et développement dans le domaine du véhicule propre et de la mobilité durable. Les deux partenaires se sont engagés sur une période de trois ans, prolongeable tacitement. Cette annonce fait suite à la création, en novembre 2009, d'une joint-venture entre le CEA et Renault pour développer et produire des batteries pour véhicules électriques (plateforme Steeve).

- Le CEA-Liten (Grenoble)

Associé à Renault, le CEA-Liten est un acteur majeur en France sur la recherche technologique dans le domaine des batteries pour véhicule électrique. Le CEA estime que l'introduction de nanomatériaux dans des batteries offre des perspectives en termes de puissance et de densité d'énergie, et donc d'autonomie. Le silicium à l'échelle nanométrique permet de réduire les distances de diffusion des électrons et des ions lithium.

Pour réduire le coût de la batterie, le CEA estime que le phosphate de fer pourrait remplacer le cobalt à l'électrode positive. A l'électrode négative, des alliages incorporant du silicium ou de l'étain pourraient doper l'énergie stockée. Pour l'électrolyte, les liquides ioniques et les céramiques ouvrent également des perspectives. On peut donc tabler sur l'arrivée de batteries plus performantes et moins chères, capables d'alimenter des véhicules hybrides ou électriques. A plus long terme, une technologie de rupture comme le lithium-soufre, dix fois plus puissante en théorie que le lithium-ion, pourra répondre aux besoins du tout électrique. Le silicium pourrait également devenir un matériau d'avenir dans la fabrication des batteries, en remplacement du fer.

Le CEA a une longue expérience sur les matériaux entrant dans la composition des batteries (optimisation de synthèse, formulation d'électrode). Certains de ces matériaux ont démontré une grande stabilité lors des tests de sécurité et des performances à régime de charge/décharge élevées. En septembre 2009, le CEA a mis en place une plate-forme technologique de réalisation de batteries en petites séries, depuis la synthèse des matériaux jusqu'au montage d'une batterie dans un véhicule. Baptisée STEEVE (Stockage d'Énergie Electrochimique pour Véhicules Électriques), cette plateforme vise à réunir les compétences et les moyens sur toutes les composantes du stockage électrochimique.

¹ Annonce faite par le groupe le 11 novembre 2011.

En décembre 2011, une voiture électrique du CEA-Liten équipée de batteries Lithium Ion à base de phosphate de fer (LiFePO₄) a parcouru 1280 km en 24 heures, en alternant des roulages et des charges rapides. Ce record du monde montre la compétence des équipes du CEA et la fiabilité de cette technologie de batteries.

- Bolloré (Quimper)

Grâce à sa filiale Batscap, Bolloré est présent sur le développement et l'industrialisation des accumulateurs au Lithium-Polymère. Batscap produit ses voitures dans une usine à Quimper inaugurée en 2009, et dispose également d'une importante unité de fabrication près de Montréal inaugurée en 2010. Bolloré détient 80% de Batscap et EDF les 20% restants. La technologie LMP développé par Bolloré a suscité une certaine méfiance au départ puisqu'il s'agit d'une approche alternative à la batterie au lithium-ion. Toutefois, le succès de Bolloré dans l'obtention du marché Autolib à Paris semble avoir démontré les performances de la Blue-car. Autolib est la plus grosse expérience dans le monde de déploiement de véhicules électrique dans une ville. Batscap anticipe une production de 20.000 Blue-car par an à partir de 2012.

- SAFT (Charente)

Saft est un leader mondial de la conception et de la production de batteries de haute technologie pour l'industrie. Le Groupe est le premier fabricant mondial de batteries à base de nickel et de lithium pour les infrastructures et processus industriels, le transport et l'électronique civile et militaire. Saft est leader mondial des batteries pour l'espace et la défense avec ses technologies Li-ion qui sont également en cours de déploiement dans les marchés du stockage d'énergie, des transports et des télécommunications. Saft emploie 4000 salariés présents dans 19 pays.

En France, Saft produit des batteries pour l'automobile dans l'usine de Nersac en Charente. Cette usine a été inaugurée en janvier 2008 en présence de sept grands constructeurs automobiles originaires de trois continents. Cette usine est une des premières au monde à produire des batteries Li-ion pour véhicules électriques et hybrides. Ses batteries équipent le véhicule hybride de série, la Mercedes Classe S 400 et la BMW Série 7 hybride. Quelques 500 personnes y travaillent.

Toutefois, suite à la récente séparation entre Saft et Johnson Controls, une incertitude demeure sur l'avenir de ce site. En effet, Johnson Controls a investi de son côté sur une usine équivalente au Michigan et les commandes affectées à l'unité de Nersac pourraient s'en ressentir.

- Imerys

Imerys est une entreprise française leader mondial des minéraux industriels. Imerys est présent dans 47 pays et emploie plus de 15 000 salariés. Par le biais de sa filiale Timcal, Imerys est fortement présent sur deux composants essentiels entrant dans la fabrication des batteries: le graphite et le noir de carbone. Timcal est actuellement leader mondial dans la technologie de production pour le noir de carbone, il fournit la plupart des constructeurs de batteries. Ce noir de carbone est produit dans une usine de Timcal en Belgique. Timcal possède en outre une importante usine en Suisse pour la production de graphite.

- La Société de Véhicules Electriques (Essonne)

La Société de Véhicules Electriques (SVE) travaille depuis 2002 sur les batteries lithium-ion et a développé la technologie Cleanbat. La SVE était une filiale à 100% du groupe Dassault, en janvier 2010, Dow Kokam a acquis la SVE. Dow Kokam est une entreprise commune de l'américain Dow Chemical et de la société américano-coréenne Townsend Kokam.

Suite à cette acquisition, Dow Kokam possède maintenant en France une unité de production de batterie dans l'Essonne capable de produire environ 15,000 packs par an, soit 5,000 petits véhicules électriques (avec un système batterie de 21 KWh). La production a commencé en 2010.

- Autres acteurs

On peut également mentionner d'autres acteurs français présents sur les batteries pour véhicule électrique :

- Mia Electric (ex Heuliez) : suite au dépôt de bilan, la société Heuliez a été séparée en deux entités distinctes et indépendantes. "Mia Electric" va dorénavant s'occuper de la conception et production d'automobiles électriques, avec pour actionnaires les sociétés Pharma-Kohl et Con-Energy, ainsi que la région Poitou-Charentes.
- La start-up Prollion, basée à Grenoble, se consacre à la fabrication "à façon" de batteries Li-ion innovantes intégrant un système de gestion, destinées aux marchés de la mobilité électrique (voiture, scooter, vélo...), de la défense, et du spatial. Prollion a été créée par le CEA-Liten en 2009.
- La PME E4V basée au Mans, est spécialiste des batteries lithium-ion pour les applications automobiles.

2.3.3. Sur les moteurs électriques

Avec Alstom Transport, la France est positionnée sur le marché des moteurs électriques pour le transport ferroviaire. Alstom Transport est leader dans les trains à grande vitesse, numéro deux dans les tramways et métros, et parmi les premières pour tout ce qui a trait aux trains électriques et aux machines à traction.

En matière de moteur électrique pour l'automobile, le français Leroy-Somer a une très grande expertise au niveau mondial. Cette entreprise internationale, dont le siège est situé à Angoulême, est devenue un spécialiste mondial en alternateurs et en systèmes d'entraînement électromécanique et électronique. Employant environ 8500 personnes, Leroy-Somer est une filiale du groupe américain Emerson depuis 1990.

En 1995, l'entreprise a participé au lancement de la Peugeot 106 Electrique. La technologie proposée par Leroy-Somer offrait l'avantage d'un couple moteur maximal dès les basses vitesses. Près de 8000 moteurs ont été produits, il s'agissait de la plus grande expérience de développement d'un parc de véhicules électriques en libre-service en Europe. Plus récemment, Leroy-Somer, Saft, Valeo et Michelin se sont fédérés pour proposer aux constructeurs automobiles des solutions adaptées aux véhicules électriques. Dans ce groupement, Leroy-Somer fournira le moteur électrique de la chaîne de traction.

Michelin développe quant à lui un produit innovant : le moteur-roue (active wheel). Le moteur-roue pourrait améliorer significativement le rendement du système de propulsion, par un facteur de 50% voire davantage. Le moteur-roue abrite deux moteurs. L'un sert à la traction du véhicule et pourrait délivrer jusqu'à 30 kW de puissance, pour un poids de 7 kg tout en récupérant l'énergie cinétique au freinage. L'autre moteur commande la suspension, à chaque mouvement enregistré par des capteurs, il permet de corriger les positions de la roue et du châssis.

2.3.4. Sur les composants pour voitures électriques

- L'alimentation du véhicule électrique

Les industriels français Schneider Electric et Legrand, spécialisés dans la gestion d'électricité, ont un positionnement industriel très important. Ainsi Schneider Electric est le numéro 1 mondial de la distribution électrique sur l'ensemble de son offre. Legrand est numéro 1 mondial des prises, interrupteurs et des câbles. Schneider Electric et Legrand développent chacun un ensemble de solutions pour la recharge du véhicule électrique.

Le produit phare de Schneider est le EVlink, décliné en autant de solutions que de configurations (station de recharge rapide, garage à la maison, immeuble de copropriété, centres commerciaux, parking payant couvert, stationnement sur voirie...). Schneider Electric propose des systèmes d'alimentation intelligents permettant notamment au véhicule de communiquer avec le réseau (flux de courant dans les deux sens en fonction de la capacité disponible sur le réseau).

- Les composants microélectroniques

Une voiture embarque actuellement environ 400 € de composants et capteurs (pression des pneus, température de l'habitacle, airbag, température du moteur, contrôle de l'injection...). Ces capteurs doivent être très résistants puisqu'ils sont soumis à des conditions d'environnement très dures: les températures peuvent varier de -40 à +1100°C, les pressions atteignent parfois 2000 bars, et il y a de nombreux cycles thermiques. Les composants doivent résister à l'humidité, au sel et à divers aérosols, et résister aux chocs et vibrations. Le franco-italien STMicroelectronics est très bien positionné sur ces technologies. Le marché de ces composants et capteurs est en forte progression, et l'électrification du véhicule est propice à l'arrivée de nombreux autres composants de ce type.

Ainsi, le « Battery Management System » (BMS) est un marché de composants spécifiques à la batterie des véhicules électriques. Le BMS est un appareil électronique capable de gérer une batterie, de faire le suivi de son état, de calculer les données, de contrôler son environnement. Un BMS reporte toutes ces informations à un ordinateur central capable d'analyser et de prendre des décisions afin de préserver la durée de vie des batteries. A travers le CEA et STMicroelectronics, la France participe à la mise en place de solutions industrielles pour les prochaines générations de BMS.

3. Filière industrielle autour du véhicule MCI hybridé

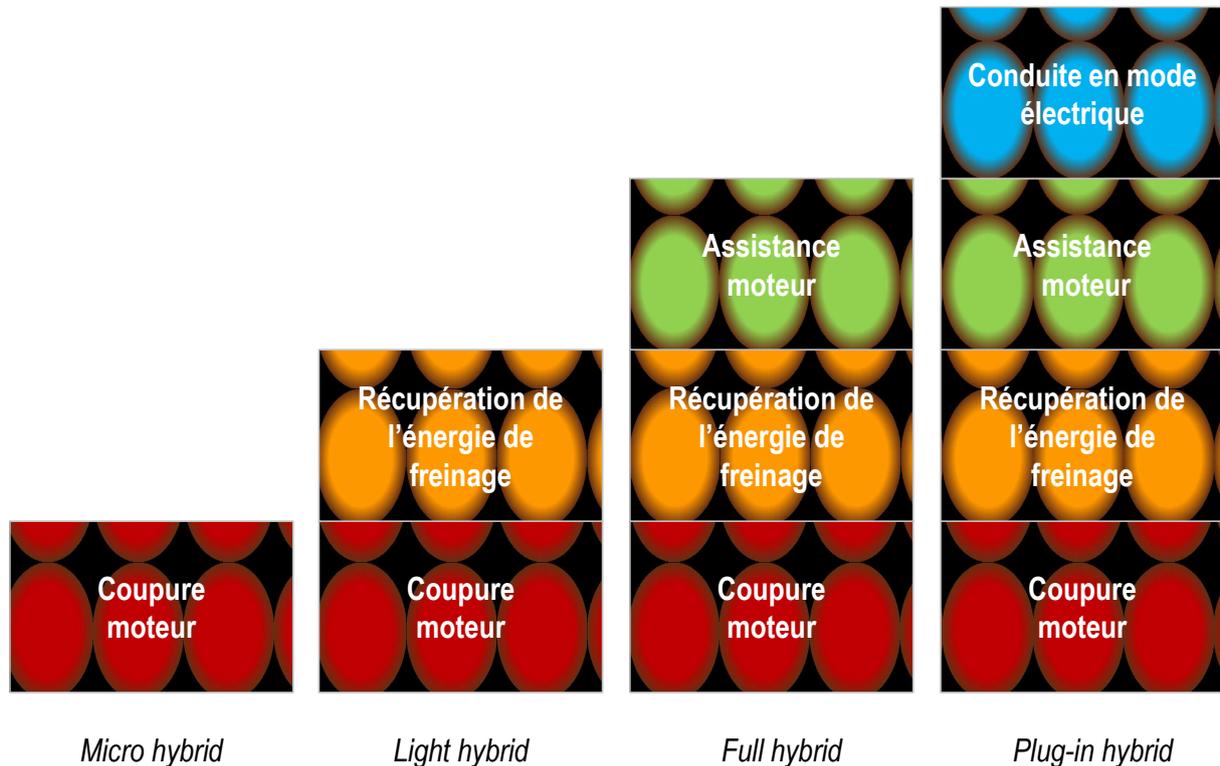
3.1. Présentation des véhicules MCI hybridés

Un véhicule MCI est un véhicule thermique qui embarque un moteur à combustion interne (MCI). Aujourd'hui ce véhicule pose un certain nombre de problème en termes d'émissions de CO₂. Aussi, la technologie de l'hybridation est apparue pour atténuer le bilan environnemental du véhicule MCI. Un véhicule MCI hybridé est donc un véhicule thermique auquel on a ajouté un certain nombre de fonctions lui permettant d'améliorer son bilan énergétique. Le véhicule MCI hybridé le plus connu est aujourd'hui la Prius de Toyota.

L'hybridation est une technologie qui consiste à associer plusieurs énergies pour assurer la propulsion du véhicule, en l'occurrence une énergie fossile et une énergie électrique stockée dans des batteries. Il est possible de distinguer les 4 technologies hybrides suivantes¹ :

¹ Le caractère « hybride » du micro et du light hybrid peut être discuté.

Les 4 technologies hybrides courantes



La **coupure du moteur** (ou « Stop and start ») est la fonction de base de l'hybride. Ce dispositif permet de couper le moteur du véhicule lorsque celui-ci est à l'arrêt (feux rouge...). Le redémarrage est alors automatique. La technologie utilisée pour permettre cet arrêt du moteur n'a pas un coût élevé, aussi à moyen terme, les constructeurs pensent la généraliser à l'ensemble de leur flotte.

La **récupération de l'énergie de freinage** est un dispositif permettant de récupérer l'énergie cinétique d'un véhicule pour recharger les batteries, au lieu que cette énergie partent en chaleur au niveau des freins. En conduite urbaine, on peut estimer qu'environ 12% de l'énergie part dans les freins. Ce dispositif a peu d'intérêt si l'énergie des batteries n'est pas utilisée par ailleurs, aussi, il se conçoit avec l'assistance électrique du moteur.

L'**assistance électrique du moteur** est un dispositif dans lequel les pointes de puissance font appel au moteur électrique plutôt qu'au moteur thermique. Ces pointes de puissance sont à la source des mauvais rendements du moteur thermique, alors que le moteur électrique peut y répondre de façon satisfaisante. Ces pointes de puissance sont de courtes durées, ce qui est conciliable avec la faible autonomie des batteries du Full Hybrid.

La **conduite en mode électrique** est la quatrième fonction d'un véhicule hybride. Cette fonction nécessite, en plus des autres, d'avoir un moteur électrique plus puissant car le véhicule est sensé pouvoir réaliser plusieurs kilomètres en mode électrique pur. Il faut aussi plus de batteries que dans la fonction précédente. Les plug-in hybrid sont rechargés sur le réseau, comme le véhicule électrique.

Sur le marché, le full hybrid est proposé depuis plusieurs années, le micro hybrid est en train d'apparaître ainsi que le plug-in hybrid. La Toyota Prius était initialement une Full Hybrid et les prochaines versions seront des plug-in hybrid avec par exemple une autonomie de 23 km en mode électrique pur pour la nouvelle version qui devrait être commercialisé en 2012.

3.2. Les défis à relever : le coût de la technologie hybride

La technologie hybride est relativement complexe car elle suppose de faire interagir, au sein d'un même véhicule, des technologies assez différentes comme le moteur à combustion et le moteur électrique. Or plus on ajoute de fonctions à l'hybride, plus sa performance est intéressante, mais plus son coût est élevé. Un véhicule de type plug-in hybrid embarque par exemple un pack batterie et une double motorisation. Ce véhicule est donc plus coûteux qu'un véhicule électrique, déjà relativement cher.

Si on met de côté le dispositif *stop and start*, on constate que les véhicules hybrides sont aujourd'hui réservés à une clientèle assez aisée, et leur pénétration en Europe se limite encore actuellement à quelques dizaines de milliers de véhicules. Aujourd'hui ce véhicule est parfois perçu comme le véhicule des « bobos » ou pire encore comme celui des stars de Hollywood. Cette critique est caricaturale, mais elle pointe néanmoins du doigt le principal problème du véhicule hybride : est-ce que ce véhicule pourra être celui de « monsieur tout le monde » ? Le succès commercial de la Toyota Prius semble le confirmer puisque cette voiture est actuellement en tête des ventes au Japon.

La rentabilité du véhicule hybride dépend en réalité beaucoup de son usage. Les avantages de l'hybride sont importants en conduite urbaine où les accélérations et les freinages sont nombreux. Les véhicules roulant beaucoup en ville (taxis, véhicules de livraison...) auraient donc a priori avantage à passer à l'hybride. A l'inverse, des véhicules dédiés à la longue distance n'ont pas intérêt à passer à l'hybride, au contraire, pour eux, les technologies hybrides peuvent devenir pénalisantes. Les véhicules de type full hybrid ou plug-in hybrid sont légèrement plus lourds, et sur autoroute ils consomment un peu plus qu'un véhicule thermique.

Un comparatif de coût entre la dernière version de la Toyota Prius et un véhicule thermique de puissance comparable est donné ci-après. Tous les coûts ne sont pas pris en compte, comme les frais d'entretien par exemple. Le coût sur la durée de vie du véhicule ressort assez proche dans les deux cas. La variable clé est la consommation d'essence, ici il s'agit d'une valeur moyenne entre une conduite sur autoroute et une conduite en milieu urbain.

	Opel Astra	Toyota Prius
Consommation d'essence (mixte) l/100 km	6,5	3,9
Prix du véhicule	21 000 €	28 400 €
Dépenses de carburant pour 200.000 km (1.5 €/l)	19 500 €	11 700 €
Coût total =	40 500 €	40 100 €

En conclusion, les technologies hybrides ont un potentiel sur certains segments du marché, même si leur coût élevé reste leur principal handicap. Si au cours des prochaines années, le coût arrive à diminuer, leur part de marché peut devenir significative. Une augmentation forte du prix des carburants pourrait également conduire au succès de cette technologie.

3.3. La position des industriels français sur ces technologies

En termes de stratégie, le constructeur en pointe sur les technologies hybrides est sans conteste Toyota qui a été le premier à lancer un véhicule de ce type en 1997, la Prius, qui s'est depuis vendue à plus de 2 millions d'exemplaires dans le monde.

La forte diésélisation du parc automobile européen est un handicap pour cette technologie. En effet, les performances de ce parc en termes de consommations et d'émissions de CO2 sont déjà assez bonnes, aussi l'avantage relatif de l'hybride est moins déterminant. A l'inverse aux Etats-Unis, la technologie hybride apporte un avantage plus fort car les véhicules sont de plus grosse tailles et sont davantage équipés en moteur à essence.

Néanmoins, les constructeurs européens et américains semblent aujourd'hui emboîter le pas et sortent à leur tour des véhicules hybrides, notamment sur leur plus gros modèle. En France, PSA indique que le dispositif stop and start sera déployé « massivement dans les gammes Peugeot et Citroën à partir de 2010 ». PSA ira plus loin à partir de 2011 avec un full hybrid mais réservera cette technologie sur des véhicules moyenne et haut de gamme (Peugeot 307 Prologue et Citroën C4 hybride). Renault semble par contre être absent sur les technologies hybrides, le groupe ayant décidé d'investir sur la technologie électrique.

L'équipementier français Valeo a été le premier industriel, en 2004, à mettre sur le marché un dispositif de type stop and start. Aujourd'hui Valéo maîtrise cette technologie et vend ce type de produits principalement à PSA et Mercedes. Valéo est également positionné sur la gestion thermique des batteries et offre une panoplie de technologies pour les véhicules hybrides et électriques.

4. Filière industrielle sur les combustibles (biocarburants)

Cette filière est différente des deux précédentes dans la mesure où elle n'aborde que la partie amont, celle du combustible. Les biocarburants peuvent avoir un rôle dans les deux filières, en appoint dans la filière électrique pour alimenter le range-extenders notamment, ou plus significativement dans le véhicule MCI hybride.

En raison de leur caractère liquide, les biocarburants sont denses, faciles à stocker et à manipuler. Aussi, offrent-ils un avantage certain par rapport à la technologie batterie. Toutefois, les biocarburants soulèvent aussi un certain nombre de problèmes, ce qui rend leur généralisation encore assez hypothétique.

4.1. Présentation des biocarburants

Trois types de biocarburants sont aujourd'hui développés :

- Les biocarburants de 1^{ère} génération fabriqués à partir de cultures alimentaires (graines de Colza, grains de blé, betteraves...).
- Les biocarburants de 2^{ème} génération fabriqués à partir de ressources ligno-cellulosiques (bois, résidus forestiers, tiges...), n'entrant donc pas en compétition avec les cultures alimentaires.
- Les biocarburants de 3^{ème} génération fabriqués à partir d'algues marines.

Les biocarburants que l'on trouve actuellement sur le marché sont des biocarburants de première génération. Les générations suivantes ne sont pas encore au point et restent encore confinées à l'objet de recherches ou de démonstrations. Deux grandes filières de biocarburants de première génération existent :

- Le bioéthanol (ou alcool éthylique) pour les véhicules à essence : la majorité du bioéthanol produit aujourd'hui provient du traitement des plantes sucrières (betterave, canne à sucre, ...) ou des céréales (maïs, blé, ...). La production de bioéthanol à partir de la biomasse se divise sommairement en trois étapes : l'hydrolyse de la

céréale afin d'obtenir du glucose, la fermentation du glucose qui permet d'obtenir un éthanol très dilué, la distillation pour extraire l'éthanol du mélange d'éthanol et d'eau.

- Le biodiesel (huiles végétales) pour les véhicules diesel : il est obtenu à partir d'huile végétale ou animale, et est transformé par un procédé chimique appelé transestérification faisant réagir cette huile avec un alcool (méthanol ou éthanol). Les plantes utilisées pour le biodiesel peuvent être du colza, du soja, et à l'avenir des algues.

En 2010, les biocarburants ont représenté 3,2% de l'ensemble de la consommation du transport routier, avec un partage à environ trois quart pour le bioéthanol et un quart pour le biodiesel. L'Europe produit environ 5% du bioéthanol produit dans le monde, et près de 60% du biodiesel.

Si la consommation de biocarburants a connu une progression importante au cours de la dernière décennie, en 2011, cette dynamique devrait se stabiliser. En Europe, on attend même une diminution de la consommation de biocarburants qui devrait être de l'ordre de 5%. L'Allemagne a notamment réduit sa politique d'aide à la filière, ce qui a eu pour conséquence de réduire la consommation.

4.2. Les défis à relever : ressource, logistique, conversion

Les biocarburants 1^{ère} et 2^{ème} génération nécessitent un certain nombre d'étapes de fabrication résumées dans le schéma ci-après. Les étapes finales de livraison et de distribution sont quasiment identiques à celles des carburants pétroliers, et parfaitement maîtrisées. Par contre, des problèmes surgissent dans l'amont de la chaîne sur la ressource, notamment du fait des rendements par hectare, sur le transport de la matière agricole, peu dense et volumineuse, enfin sur la conversion, du fait des procédés de transformation.

Les étapes de la filière du véhicule aux biocarburants



4.2.1. La ressource

Avec la première génération, la ressource entre en concurrence directe avec les cultures alimentaires, ou indirecte avec les surfaces forestières (déboisement), ce qui pose des problèmes tant du point de vue humain qu'environnemental. De fait, la plupart des études estiment que la part de marché des biocarburants de première génération ne pourra pas dépasser environ 15% de nos besoins de carburant.

Cette tension sur la ressource peut être en partie résolue avec les biocarburants de deuxième génération, qui utilisent la partie non valorisée des plantes alimentaires, et des ressources ligneuses à courte rotation. Par contre, comme nous allons le voir dans le point suivant, cette technologie pose d'autres problèmes.

Avec la troisième génération, la tension sur la ressource peut en théorie complètement disparaître du fait de l'ampleur des espaces, naturels ou artificiels, sur lesquels peuvent être cultivées les algues. A titre d'exemple, l'entreprise BFS en Espagne vise à produire des biocarburants de troisième génération à partir d'algues élevées dans des futs en verre dans

lesquels on reproduit le phénomène de photosynthèse, en utilisant des émissions industrielles de CO₂ disponibles dans un environnement proche. Toutefois, ces procédés sont encore assez expérimentaux, et comme souvent la difficulté tient précisément dans le passage de prototypes à des technologies industrielles apportant une solution à grande échelle.

4.2.2. Le transport de la biomasse jusqu'à l'unité de conversion

Le transport de la ressource à l'unité de conversion est un vrai verrou pour les biocarburants de 1^{ère} et 2^{ème} génération. En effet, les matières végétales ou sylvicoles sont coûteuses à transporter du fait de leur faible densité énergétique, ce qui limite le périmètre de collecte autour de l'installation de conversion, et par conséquent les économies d'échelle dans la conversion.

De fait il faudrait multiplier les unités de conversion sur le territoire, de façon à ce que le transport amont ne dépasse pas quelques dizaines de kilomètres. En contrepartie, les unités sont de petites tailles, ce qui augmente le coût de la conversion. En réalité, seules les parcelles agricoles à proximité des usines de conversion pourraient être éligibles à une transformation. Il y a là probablement matière à réviser à la baisse le potentiel technico-économique des biocarburants.

Les biocarburants de 3^{ème} génération n'ont pas ce problème puisque les intrants se résument à de l'eau de mer, des micro-algues, du soleil et du CO₂, intrants qu'il est possible de combiner dans de nombreuses situations, sans problème majeur de transport si ces unités sont en bord de mer, ou à quelques kilomètres avec un transport par pipe par exemple.

4.2.3. La conversion de la biomasse en biocarburants

Un grand nombre de chercheurs travaillent actuellement à améliorer le rendement de conversion de la biomasse en biocarburants. Il y a beaucoup de procédés chimiques potentiellement disponibles, chacun étant adapté au type de ressource utilisée (« sugar platform », « lipid platform »...). La conversion pose deux problèmes :

- Le rendement lui-même qui peut remettre en cause l'opportunité de la production de biocarburants. Il existe notamment des usages concurrents où le rendement peut être meilleur, ainsi la combustion du bois-énergie pour le chauffage a un rendement proche de 100%.
- Le coût de la conversion : le but final étant de délivrer un produit compétitif, notamment par rapport à d'autres systèmes techniques comme le véhicule à batterie par exemple.

Même si des progrès ont été faits, les rendements de conversion des biocarburants devront encore s'améliorer pour que cette technologie puisse se développer.

4.3. La position des industriels français sur ces technologies

Les tableaux suivants montrent la position de la France en matière de biocarburant. Notre pays est 6^{ème} pour la production de bioéthanol dans le monde et 3^{ème} pour la production de biodiesel.

Principaux producteurs de biocarburants dans le monde, en 2010 en Mtep

	Bioéthanol		Biodiesel
Etats-Unis	25,3	Brésil	2,2
Brésil	12,3	Allemagne	2,0

Chine	1,09	France	1,9
Allemagne	0,73	Italie	1,5
Canada	0,7	Etats-Unis	1,0
France	0,45	Argentine	0,8
Espagne	0,44	Espagne	0,8
Inde	0,31	Belgique	0,7
Thaïlande	0,3	Biélorussie	0,5
Suède	0,2	Thaïlande	0,5
Autres pays	0,58	Autres pays	3,7
Monde	42,4	Monde	15,6

Source : Enerdata

Les principaux industriels français en bioéthanol sont Tereos et Cristal Union. Tereos, avec Abengoa Bioenergy (Espagne) et CropEnergies (Allemagne) est un des trois premiers producteurs de bioéthanol en Europe, il détient 7 unités de production en Europe. L'industrie française et européenne du bioéthanol est relativement peu développée si on la compare à ce qui existe au Brésil, et surtout aux Etats-Unis.

Au début des années 2000, un grand nombre d'industriels ont investi dans la canne au Brésil. Aujourd'hui, certains experts estiment que le différentiel de compétitivité entre le Brésil et l'Europe se réduit. Le développement économique du Brésil a provoqué une hausse des salaires et une hausse du coût de récolte de la canne à sucre. Dans le même temps, la betterave européenne progresse en rendement. Tereos estime « qu'il n'est plus impensable d'imaginer que, d'ici 2020, la compétitivité de la betterave rejoigne celle de la canne ».

En matière de biodiesel, le continent européen a une position clé puisqu'il produit environ 60% du biodiesel dans le monde. L'acteur français Diester Industries (groupe Prolea-Sofiproteol) est le numéro 1 mondial sur la filière biodiesel. Diester Industries possède 7 unités de production en France et 7 autres en Europe. Les autres grands industriels européens sur cette filière sont allemands (ADM Biodiesel, Verbio, Cargill...), et suisse (Biopetrol Industries).

En 2010, Diester Industries indique avoir eu un chiffre d'affaires de 2,3 milliards d'euros pour 2,35 millions de tonnes de biodiesel vendus¹. On déduit que 1 litre de biodiesel génère à peu près 0,9 euro de revenu aux industriels.

Les grands majors pétroliers se positionnent davantage sur la R&D et ciblent la deuxième et troisième génération. BP et Exxon Mobil semblent être en pointe dans le développement de ces technologies. Les investissements qu'elles ont réalisés se chiffrent en plusieurs milliards de dollars chacune.

En France, Total a racheté 17% du capital d'Amerys, une start-up créée en 2003 dans la Silicon Valley en Californie. L'entreprise dispose de laboratoires en Californie et au Brésil ainsi que d'une usine pilote et d'un site de démonstration au Brésil. Amyris a mis au point une plateforme industrielle pour transformer et sélectionner des levures, à grande vitesse. Par fermentation du jus de canne, ces levures peuvent produire du biodiesel, du biolubrifiant ou des intermédiaires chimiques.

¹ Le chiffre d'affaires de Diester Industries n'est pas uniquement composé de la vente du biodiesel, mais aussi de co-produits résultant du process de fabrication, comme la glycérine pour les produits cosmétiques et d'hygiène ou les tourteaux qui servent à l'alimentation des animaux d'élevage.

5. Services économiques rendus par ces filières industrielles

Ces nouvelles technologies routières vont offrir des opportunités à d'autres secteurs. Le véhicule électrique pourrait apporter de nouveaux services aux gestionnaires du réseau électrique. Les biocarburants pourraient, quant à eux, apporter à certains industriels ou certaines centrales électriques un service dans la captation de leurs émissions de CO₂.

5.1. Véhicules électriques et gestion du réseau électrique

L'objectif que s'est fixé le gouvernement à l'horizon 2020 est d'avoir deux millions de véhicules électriques et hybrides dans le parc français. Deux millions de véhicules électriques et hybrides devraient générer une consommation annuelle d'électricité de 6 TWh, soit environ 1% de la production annuelle française.

Ce résultat montre que cette nouvelle demande d'électricité n'est pas très importante, et donc que le réseau devrait avoir la capacité de l'absorber. Quelques nuances pourraient être apportées entre l'été et l'hiver, avec une situation plus tendue en hiver, mais cela ne devrait pas modifier fondamentalement la conclusion.

Toutefois, si en moyenne annuelle, le véhicule électrique a un impact faible sur le réseau, il est nécessaire que le rechargement des batteries se fasse de façon intelligente, c'est-à-dire en étalant au mieux les périodes de rechargement. L'appel de puissance de 2 millions de véhicules électriques et hybrides pourrait être de l'ordre de 3 GW, à comparer aux 80 GW opérationnels du réseau français. Cette demande supplémentaire pourra être assez facilement satisfaite la nuit, par contre il y a des périodes de la journée où cette demande pourrait poser problème au réseau.

A un horizon 2020, le réseau électrique français sera sensiblement proche de celui d'aujourd'hui. La problématique de la collecte de l'électricité intermittente par le biais du véhicule électrique ne se posera pas encore vraiment, en tout cas pour la France. Par contre, des optimisations du réseau électrique seront déjà possibles, notamment à deux niveaux :

- 1^{er} niveau : recharger les véhicules électriques pendant les creux de consommation, en particulier la nuit.
- 2^{ème} niveau : recharger les véhicules électriques pendant les creux de consommation et utiliser la batterie du véhicule pour alimenter le réseau lorsque celui-ci est en pointe, notamment le soir.

Le deuxième niveau, plus ambitieux, est déjà mis en pratique. Cette interaction entre le véhicule électrique et le réseau existe au Japon puisque la Nissan Leaf est capable de redonner de l'électricité au réseau au moment des pointes. Les voitures Leaf ont notamment alimenté le réseau japonais au cours de l'été 2011 aux heures de fortes demandes, certes pour des volumes encore symboliques.

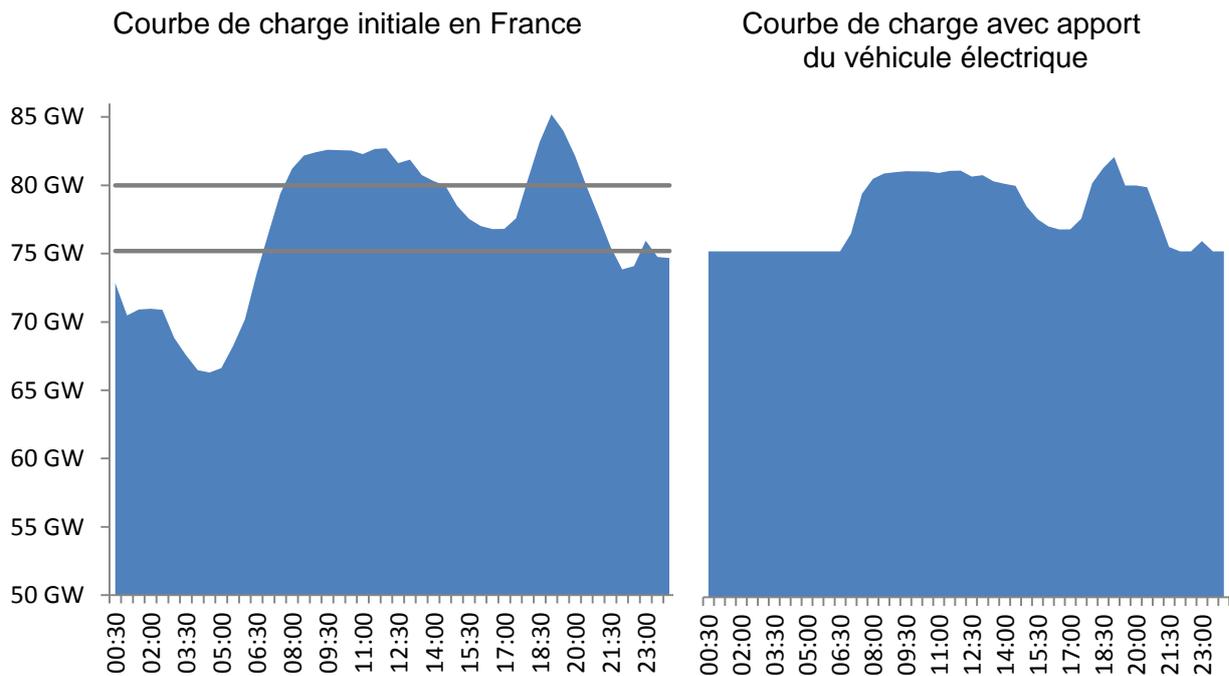
Nous avons cherché à modéliser ce que pourrait être cette interaction pour la France, en se projetant en 2020 pour une journée type en hiver¹. Les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Le parc de véhicules électriques se monte à deux millions d'unités.
- Les véhicules roulent 40 km par jour en semaine, soit une consommation journalière de 25 GWh pour l'ensemble du parc.

¹ Soit le mercredi 20 janvier 2011. Il s'agit d'une date représentative d'une journée d'hiver pour la France.

- Les véhicules électriques sont dotés de puces intelligentes leur permettant de communiquer avec le réseau.
- Sur la tranche horaire de journée, soit 8h-19h, on suppose qu'en moyenne 60% des véhicules sont connectés au réseau électrique, sur la tranche horaire de nuit 19h-8h, 100% des véhicules sont connectés au réseau.

Avec ces hypothèses, le parc de véhicules électriques va être en mesure de combler en partie le creux de consommation en apportant 38 GWh de demande supplémentaire la nuit, et de restituer 13 GWh environ au réseau au moment de la pointe. Le schéma suivant résume cet impact et montre ce que les centrales électriques devront produire avant et après prise en compte des véhicules électriques :



Source : RTE pour la courbe de gauche (situation du mercredi 20 janvier 2011, qui correspond à une journée d'hiver moyenne). La courbe de droite a été modélisée par Enerdata.

La figure de droite est plus favorable pour le réseau, le véhicule électrique permet de lisser significativement la production des centrales électriques, en apportant une demande supplémentaire dans les périodes de creux, et en rendant une partie de l'électricité dans les horaires de pointe. Les hypothèses peuvent bien sûr être discutées, mais ce résultat a été obtenu avec seulement 2 millions de véhicules électriques, ce qui est relativement modeste par rapport à un parc français qui compte 30 millions de véhicules.

On voit donc que le réseau électrique dans sa configuration actuelle, c'est-à-dire sans intégrer beaucoup d'électricité renouvelable intermittente, pourrait voir sa situation s'améliorer assez significativement grâce à l'arrivée du véhicule électrique.

Le véhicule électrique n'est pas la seule consommation susceptible d'être reportée dans le temps. Le lave-vaisselle et le lave-linge pourraient eux aussi jouer ce rôle, en étant déclenchés la nuit. Nos calculs montrent que leur impact sur le creux de la nuit pourrait être presque aussi important que le véhicule électrique. Par contre, ces appareils n'ont pas, à la différence du véhicule électrique, la capacité à rendre de l'électricité au réseau et donc de participer au lissage de la pointe.

Cette analyse semble montrer un potentiel intéressant du véhicule électrique pour lisser la courbe de charge liée à la demande. Nous avons ici pris en compte la volatilité liée à la demande d'électricité, pas celle liée à l'offre avec notamment l'introduction croissante

d'électricité renouvelable intermittente. Qu'en est-il du potentiel du véhicule électrique pour lisser également cette dernière ?

5.2. Véhicules électriques et collecte de l'électricité renouvelable intermittente

A priori, le véhicule électrique et l'électricité renouvelable intermittente sont deux technologies complémentaires. Le bilan CO2 d'un véhicule électrique sera d'autant meilleur qu'on disposera d'électricité non carbonée, et dans beaucoup de pays européens il pourrait s'agir de renouvelables plus que de nucléaire (Allemagne, Italie, Espagne...). Inversement, le développement des éoliennes ou des panneaux solaires sera aidé par le déploiement en parallèle de dispositifs de stockage d'électricité, les véhicules électriques pouvant jouer ce rôle.

Une éolienne peut se mettre à produire de l'électricité au milieu de la nuit quand la demande est faible. Statistiquement, on observe même que la production des éoliennes est un peu plus élevée la nuit que le jour. Aujourd'hui dans certains pays ayant développé fortement l'éolien, l'intégration de cette source d'énergie sur le réseau pose des problèmes croissants. En Allemagne par exemple, au cours des 4 dernières années, la capacité éolienne installée a continué de croître, par contre la production d'électricité d'origine éolienne n'a pas augmenté, elle a même un peu diminué. Une partie de l'explication vient notamment du fait qu'à certaines périodes de vents forts, certaines éoliennes sont tout simplement arrêtées car on ne sait plus comment écouler l'électricité produite.

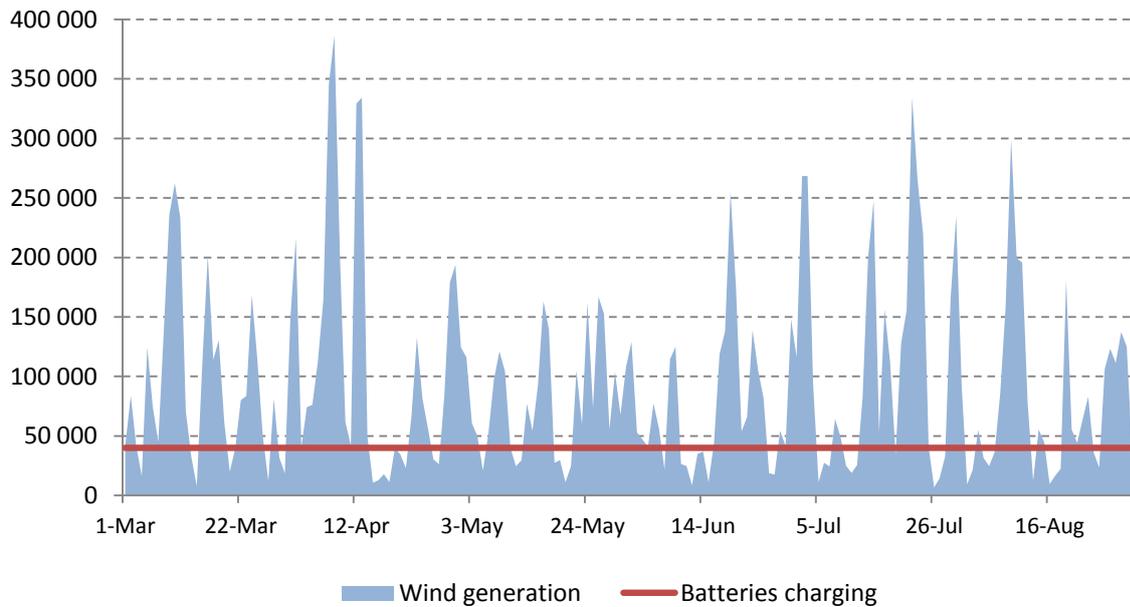
Quel peut être l'apport du véhicule électrique dans sa capacité à stocker l'électricité intermittente, notamment d'origine éolienne ?

Avec 160 km d'autonomie, un véhicule électrique peut stocker jusqu'à 40 kWh. Cette énergie est suffisante pour rouler quatre jours sans recharge, en supposant que le véhicule consomme 0,25 kWh par km et roule en moyenne 40 km par jour. Prenons le cas allemand et supposons qu'il y a 4 millions de véhicules électriques dans le pays. Avec un tel parc de véhicules, on peut en théorie stocker 160 GWh.

Le graphique suivant montre le profil de puissance éolienne actuel, sur une base quotidienne, entre mars et août 2011 pour l'Allemagne. Sur ce graphique, la ligne rouge montre le besoin de recharge des véhicules électriques s'ils rechargent chaque jour. En d'autres termes, s'il n'y a pas de charge « intelligente » du véhicule sur la semaine.

La bonne nouvelle est que la production éolienne pourrait être suffisante pour recharger les véhicules électriques la plupart du temps. La mauvaise nouvelle est que le rechargement des batteries ne permet pas vraiment d'atténuer les conséquences des pics de vent. Sur ce semestre, il y a environ 23 jours où l'énergie éolienne disponible sur le réseau dépasse de 150 GWh le besoin de rechargement des batteries.

Production éolienne et recharge des véhicules électriques

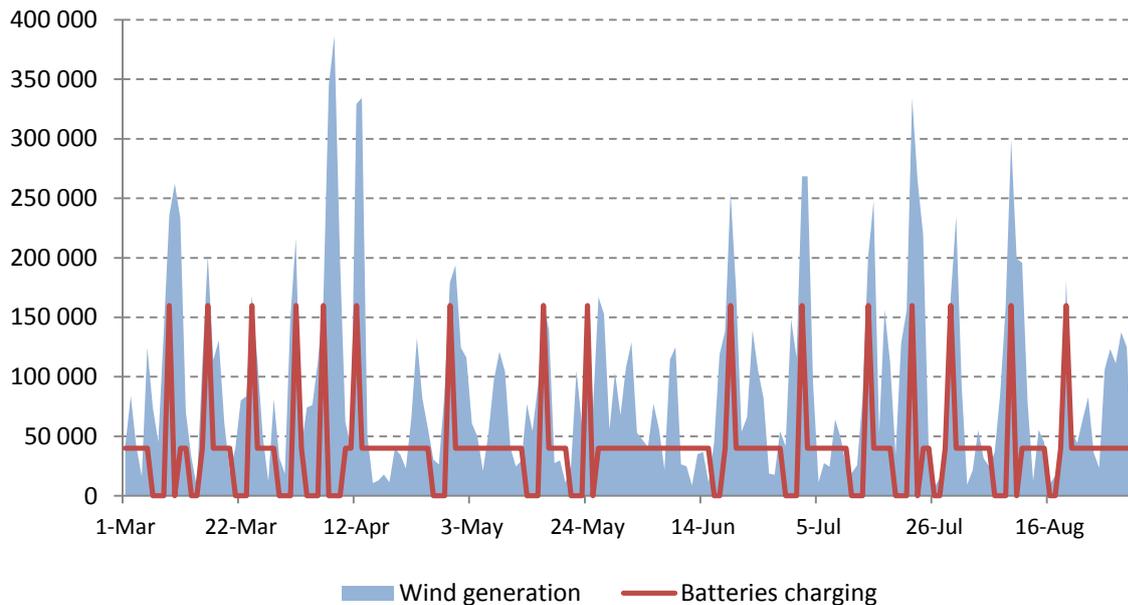


Source : Enerdata

Supposons maintenant une façon plus intelligente de recharger les véhicules électriques. En tenant compte des prévisions météorologiques, on peut anticiper les pointes de vent. Le but est d'avoir des batteries presque vides la veille d'épisodes de vents forts. On peut alors recharger davantage pendant cette période et contribuer ainsi à mieux lisser la pointe de production. Cette gestion suppose que les gens ne se précipitent pas sur la recharge à chaque fois qu'ils le peuvent, et qu'ils acceptent parfois de conduire avec des batteries non entièrement chargées.

Le graphique ci-dessous montre que la situation s'est améliorée, mais pas tant que ça finalement. Les pics de production continuent d'impacter de manière significative le réseau électrique. Lorsque le vent est fort pendant plusieurs jours consécutifs, le premier jour peut être plus ou moins bien lissé, mais les jours qui suivent, les batteries étant pleines à 75%, et il y a moins de possibilité de recharger. Avoir du vent fort en continu pendant plusieurs jours est une situation finalement assez courante. Dans le cas allemand, il y a encore 20 jours où la puissance éolienne disponible, nette de la charge électrique, dépasse 150 GWh, soit seulement 3 jours de moins que dans le cas précédent.

Production éolienne et recharge dynamique des véhicules électriques



Source: Enerdata

Le système peut encore être amélioré si les batteries sont également utilisées pour rendre de l'électricité au réseau. On peut ainsi avoir une gestion encore plus dynamique, en chargeant et déchargeant les batteries au gré des opportunités. Cela peut notamment rendre un service dans les périodes où l'intermittence du vent est forte. Bien que les conséquences d'une telle gestion des batteries n'aient pas été calculées, il semble que cela ne changerait pas radicalement les observations faites ci-dessus.

Si les véhicules électrique rendent un service au réseau, il ne faut pas non plus surestimer le rôle d'amortisseur qu'ils peuvent jouer pour faciliter l'intégration de l'électricité intermittente, et notamment l'éolien. Evidemment, ce résultat dépend du profil de production éolienne considérée et du nombre de véhicules électriques en circulation. Mais on peut penser que dans beaucoup de pays, la production éolienne devrait dépasser de loin les capacités de stockage offertes par les véhicules électriques.

5.3. Biocarburants et réutilisation des émissions de CO₂ des industriels

La technologie CCS (Carbon Capture and Storage) pourrait être en mesure de neutraliser les émissions de CO₂ rejetées par de grosses unités industrielles. Une incertitude demeure néanmoins sur le coût de cette technologie et sur le potentiel de CO₂ qu'il sera finalement capable de stocker. La qualité des aquifères dans lesquels sera stocké le CO₂ est elle aussi mise en avant, avec une incertitude en terme de sécurité et de longévité de ce stockage.

La production de biocarburants de 3^{ème} génération offre la possibilité de réutiliser le CO₂ émis par des grosses unités industrielles. En Espagne, l'entreprise BFS promeut notamment cette technologie. Le procédé développé valorise les émissions industrielles de CO₂ pour les transformer en un biopétrole similaire au pétrole d'origine fossile.

Selon cette entreprise, le carburant BFS présenterait un bilan carbone négatif sur un cycle complet. La société BFS a calculé qu'un véhicule de 135 chevaux parcourant une distance de 100 km émettrait -48 kg de CO₂, contre environ +19 kg pour un véhicule utilisant des carburants pétroliers. L'empreinte positive du carburant BFS s'explique par le fait que la

quantité de CO₂ rejetée par le véhicule est inférieure à la quantité de CO₂ absorbée par BFS pour produire le pétrole. La production d'un baril neutraliserait environ 940 kg de CO₂, en tenant compte des émissions et absorption du CO₂ lors du procédé. Le coût de production de ce biopétrole ressortirait à environ 30 dollars le baril, en raison de la valorisation de certains co-produits.

L'empreinte au sol est souvent le principal point faible des biocarburants. Ici, la société indique qu'il est possible de produire par hectare 5500 barils par an, soit 100 à 200 fois plus que ce que peuvent produire les biocarburants actuels de première génération. BFS expérimente actuellement une usine de 11 hectares construite à Alicante, près d'une cimenterie.

6. Impacts économiques en termes d'emplois

Ce chapitre analyse l'impact économique d'un déploiement de véhicules électriques et hybrides en France. Ces véhicules pourraient notamment avoir un impact sur l'industrie automobile, sur l'industrie électrique, et sur l'industrie des biocarburants. Nous nous sommes projetés en 2030 et avons supposé un objectif ambitieux, celui d'avoir 10 millions de véhicules électriques et hybrides circulant en France, soit un peu moins d'un véhicule sur trois. Ces véhicules se décomposent en 5 millions de véhicules électriques purs et 5 millions de véhicules plug-in hybrid consommant pour une moitié des kilomètres réalisés de l'électricité et pour l'autre moitié des biocarburants.

6.1. Présentation de la problématique

A l'horizon 2030, le coût d'utilisation d'un véhicule thermique pourrait être assez proche de celui d'un véhicule électrique, hors effets de la fiscalité et des subventions. A l'inverse, ces deux véhicules pourraient se différencier sur le plan économique car le véhicule électrique et hybride pourrait utiliser davantage de ressources produites sur le sol national, et faire donc moins appel aux importations.

Pour le véhicule thermique, il est possible d'estimer la part des importations dans le coût d'utilisation de ce véhicule. Il y a d'abord des importations au niveau des véhicules eux-mêmes puisque aujourd'hui, pour 100 € de véhicules achetés en France, 55 € bénéficient aux importations. Au niveau du carburant, le pétrole brut est entièrement importé, c'est un poste de coût majeur et qui pourrait peser de plus en plus. Par contre, la valeur ajoutée liée à la distribution du carburant dans les stations-services bénéficie à la France. Le raffinage est quant à lui dans une position intermédiaire. En résumé, sur l'ensemble de sa durée de vie, le véhicule thermique peut coûter environ 30.000 €, dont environ 20.000 € correspondant à des importations et 10.000 € à des dépenses profitant à des acteurs nationaux. Il s'agit là d'une vision à 2030, la situation actuelle n'est toutefois pas très différente.

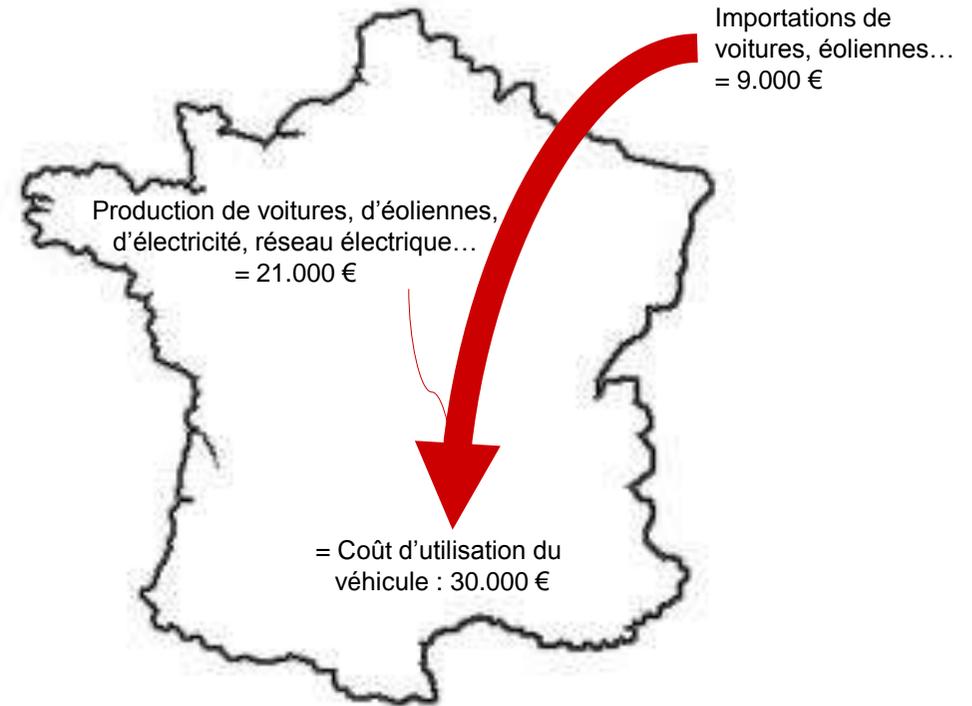
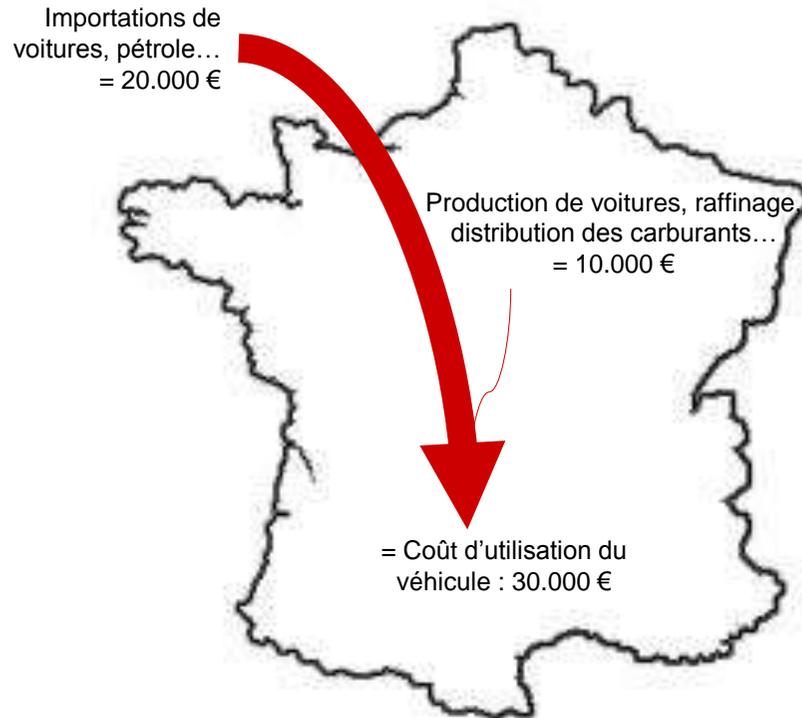
Pour le véhicule électrique et hybride, l'enjeu économique est de récupérer une plus grosse part de valeur ajoutée sur le sol national. Il s'agit encore d'un pari à ce stade. Pour l'électricité et les biocarburants, on peut penser que ces énergies seront essentiellement produites en France. Pour la fabrication des véhicules électriques et hybrides, et pour la fabrication des équipements de production d'électricité, c'est plus incertain. La compétitivité de notre industrie sur ces technologies sera la clé du partage de cette valeur ajoutée.

Dans la suite de ce chapitre, nous essayons de quantifier plus précisément l'activité économique et les retombées en emploi lié au déploiement de ces véhicules. La problématique peut être résumée par le schéma suivant, la carte de droite donne une vision optimiste où une part importante de la valeur ajoutée liée au véhicule électrique et hybride serait réalisée en France.

**Les enjeux économiques autour du véhicule électrique et hybride :
réaliser une plus grande part de la valeur ajoutée sur le sol national**

Un véhicule thermique : environ 35% de la valeur ajoutée est réalisée en France

Un véhicule électrique ou hybride : objectif d'aller vers 70% de la valeur ajoutée réalisée en France



* Le coût d'utilisation d'un véhicule comprend l'achat du véhicule et l'achat de carburant pour réaliser 200.000 km.

6.2. Impact sur la filière énergie

6.2.1. Sur la filière production d'électricité

L'introduction de 10 millions de véhicules électriques et hybrides en France, en remplacement de véhicules thermiques, va nécessiter une production annuelle d'électricité de 23 TWh environ. On supposera que la production d'électricité est faite en France et est essentiellement d'origine renouvelable de façon à garantir un faible contenu CO2 au véhicule électrique.

On supposera qu'à l'horizon 2030, les technologies renouvelables permettront de produire de l'électricité au coût moyen de 60 € le MWh. Aujourd'hui, le coût de l'éolien est déjà de l'ordre de 60 € le MWh, voire moins, et le coût des fermes solaires photovoltaïques est de l'ordre de 140 € le MWh. On constate une diminution de ces coûts année après année. Le coût pourrait donc être inférieur, mais il faudra aussi probablement prévoir quelques systèmes de back-up. Le coût retenu ici peut être discuté, il y a de fait une incertitude sur les coûts futurs de ces équipements.

A cela, il faut ajouter le coût du réseau électrique et de la distribution jusqu'à l'utilisateur final. Ce coût peut être estimé à environ 70 € le MWh. Dans le cas où l'électricité est produite en toiture à partir de panneaux PV chargeant directement le véhicule électrique, on considèrera que ce coût est proche de celui estimé pour l'électricité de réseau. On supposera par ailleurs que les véhicules électriques sont principalement chargés dans le garage ou sur un espace jouxtant la résidence principale.

Cette production d'électricité peut donc être valorisée à 2,9 Md€. C'est une valeur ajoutée que captera l'ensemble de la filière, soit les fabricants des équipements de production d'électricité (éoliennes, systèmes PV...), les producteurs d'électricité, et les gestionnaires du réseau jusqu'au client final.

On supposera que l'essentiel de la valeur ajoutée liée à cette filière est faite en France, hormis pour la fabrication des équipements de production d'électricité (éoliennes, systèmes PV...). Pour ces fabricants d'équipements, on fera deux hypothèses, l'une ou deux tiers de la fabrication est faite en France, l'autre moins optimiste ou ce chiffre se monte à un tiers, l'essentiel étant donc importé. Dans la mesure où ces équipements représentent environ 46% de la valeur ajoutée de la filière (60 € sur 130 €), cela revient donc à dire que dans l'hypothèse haute, 85% de la valeur ajoutée de l'ensemble de la filière est réalisée en France, contre 69% dans l'hypothèse basse.

En supposant un coût du travail de 70 k€ par emploi en moyenne dans cette filière, cette valeur ajoutée de 2,9 Md€ équivaut, dans l'hypothèse haute pour la France, à $2,9 \text{ Md€} \times 85\% / 70 \text{ k€}$, soit 36.000 emplois.

6.2.2. Sur la filière biocarburants

Les véhicules plug-in hybrid utiliseront pour partie des biocarburants. On fera l'hypothèse que sur les 12.000 km réalisés par an et par véhicule, la moitié repose sur énergie électrique, l'autre sur une énergie de type biocarburants. Compte tenu du nombre de véhicules électriques et hybrides, la production de biocarburants devrait s'élever à 1,5 milliards de litres, réalisée intégralement en France dans notre hypothèse. On suppose que le coût de production du litre à horizon 2030 est d'environ 1,0 €, cela donne un chiffre d'affaire pour cette filière de 1,5 Md€ par an. Le coût du travail étant supposé être de 70 k€ par emploi, la filière devrait donc créer 21.000 emplois.

6.2.3. Sur la filière carburants pétroliers

La filière des carburants pétroliers va, quant à elle, perdre un certain nombre d'emplois dans les opérations de raffinage, de transport du carburant en camion-citerne, et dans la distribution des carburants dans les stations-services.

L'introduction de 10 millions de véhicules électriques et hybrides en France, en remplacement de véhicules thermiques, devrait permettre d'économiser chaque année environ 7,1 millions de tonnes équivalent pétrole (tep), sur la base des niveaux de consommation moyen par véhicule que l'on peut observer actuellement. Ce volume de carburant représente aujourd'hui une valeur de 4,6 Md€ environ au prix hors taxes de 0,65 € le litre. Ce prix unitaire se décompose à peu près ainsi : pétrole brut (0,52 € le litre), raffinage (0,06 € le litre), transport et distribution dans les stations-services (0,07 € le litre).

La perte de valeur ajoutée pour la France se fait uniquement sur le raffinage, le transport et la distribution. On supposera à l'horizon 2030, que la moitié du raffinage est faite en France, ce qui nous amène à retenir une perte de valeur ajoutée égale à 0,10 € par litre (0,03 pour la raffinage et 0,07 pour le transport et la distribution). Avec un coût moyen du travail de 70 k€ par emploi, cela donne une perte de 10.000 emplois.

6.2.4. Bilan global sur la filière énergie

Le remplacement du pétrole par de l'électricité et des biocarburants pourrait avoir à l'horizon 2030 des effets économiques positifs sur l'emploi. Produire nous-même l'énergie dont nos véhicules auront besoin est créateur d'activités pour notre pays. Les créations d'emplois sont résumées ci-après :

Emplois industriels créés dans la filière énergie

	Emploi équivalent temps plein par an	
	hypothèse basse	hypothèse haute
Perte d'activité sur les carburants pétroliers	-10.000	-10.000
Production d'électricité en France	29.000	36.000
Production de biocarburants en France	21.000	21.000
Emploi total créé	40.000	47.000

Source : Enerdata

6.3. Impact sur la filière automobile

Si sur la filière énergie, l'impact économique pour la France sera a priori positif, sur la filière automobile, les choses sont plus incertaines.

En première analyse, on peut penser qu'en passant du véhicule thermique au véhicule électrique et hybride, il n'y a pas de création nette d'emplois car la fabrication de ces véhicules mobilise plus ou moins le même nombre de personnes. En réalité, les technologies liées au véhicule électrique risquent de « rebattre les cartes » entre constructeurs automobiles, et leur positionnement futur peut être assez différent de l'actuel. Compte-tenu du positionnement plutôt précurseur de notre industrie sur cette technologie (voir chapitres précédents), le déploiement de véhicules électriques et hybrides pourrait avoir un impact positif sur la filière automobile française. Bien sûr, il s'agit d'une hypothèse car rien ne

permet d'affirmer que les technologies développées actuellement en France s'imposeront, la Chine investit également sur cette filière et a des ambitions fortes.

Le raisonnement sera fait par scénario. Nous tâcherons notamment de vérifier s'il est pertinent de déployer le véhicule électrique et hybride en France dans l'hypothèse où notre pays maîtriserait un nombre limité des éléments de cette technologie, et donc si cela devait conduire à augmenter nos importations ? La réponse dépend de la comparaison des gains et pertes sur la filière énergie d'une part et sur la filière construction automobile d'autre part.

Cette question est d'autant plus importante qu'il y a un antécédent proche. Au cours des années 2000, la France, avec d'autres pays, a soutenu l'achat de panneaux photovoltaïques, pensant ainsi réduire des consommations d'énergie fossiles. Résultat, la plupart des fabricants européens ou américains de PV sont aujourd'hui en très mauvaise santé. Aux Etats-Unis, Solyndra a fait faillite en septembre 2011, Q-Cells qui était le leader européen est en très mauvaise posture, le leader français Photowatt est en liquidation judiciaire depuis novembre 2011, et BP vient d'annoncer qu'il allait vendre sa filiale BP Solar pour cause de mauvaise rentabilité. La plupart des panneaux installés en Europe et aux Etats-Unis viennent aujourd'hui de Chine. Dans ces conditions, le bilan économique est-il toujours bon ? Le bénéfice en termes de production d'énergie compense-t-il la perte économique liée à l'importation des panneaux photovoltaïques ? C'est ce type de question qu'il faut se poser pour le véhicule électrique et hybride.

Aujourd'hui la filière automobile française est légèrement déficitaire, nous importons un peu plus de véhicules en valeur que nous en exportons. Compte-tenu de notre hypothèse sur un parc automobile comptant 10 millions de véhicules électriques et hybrides en 2030, on peut tabler à cet horizon qu'environ 0,8 million de véhicules électriques et hybrides seront achetés chaque année en France. Deux scénarios vont être regardés :

- Le premier, optimiste, où il est considéré que deux tiers de la valeur ajoutée liée à la fabrication de ces véhicules vient d'une production nationale. Dans ce scénario, sur les 0,8 million de véhicules électriques et hybrides achetés par an, environ 528.000 sont donc fabriqués en France, soit un gain de production pour la filière automobile de 168.000 véhicules par rapport à la situation actuelle. Exprimé en emploi et compte-tenu des ratios de productivité¹, le gain s'établit à environ 60.000 emplois par an pour la France par rapport à la situation actuelle.
- Le deuxième scénario est moins favorable. On considère qu'un tiers de la valeur ajoutée liée à la fabrication des véhicules électriques et hybrides est issu d'une production nationale. Dans ce scénario, environ 266.000 véhicules électriques et hybrides sont fabriqués en France, soit une perte de production pour la filière automobile de 96.000 véhicules par an par rapport à la situation actuelle. Exprimée en emploi, cette perte se monte à environ 34.000 personnes.

Emplois industriels créés dans la filière automobile

	Emploi équivalent temps plein par an	
	hypothèse basse	hypothèse haute
Fabrication des véhicules électriques	-17.000	29.000
Fabrication des véhicules hybrides	-18.000	31.000
Emploi total créé	-35.000	60.000

Source : Enerdata

¹ On supposera à nouveau que le coût du travail dans cette filière est en moyenne de 70 k€ par emploi.

proximité, école, services à la personne, services publics....). Notre modèle a ventilé ces emplois comme suit.

Emplois créés dans le reste de l'économie (services à la personne...)

	Emploi équivalent temps plein par an	
	hypothèse basse	hypothèse haute
Agriculture	1 100	7 400
Industrie	1 500	9 800
Construction	2 200	14 200
Commerce	5 900	38 700
Transports	1 700	11 000
Activités financières	1 300	8 700
Activités immobilières	500	3 400
Services aux entreprises	6 100	40 300
Services aux particuliers	3 800	25 300
Education, santé, action sociale	10 100	66 300
Administration	5 200	34 000
Emploi total créé	39 400	259 000

Source : Enerdata

6.5. Bilan global en emploi

La situation actuelle où les véhicules utilisent une énergie importée est pauvre en activité économique pour notre pays. Fabriquer les véhicules électriques et hybrides et produire l'énergie dont ils auraient besoin devrait faire émerger une nouvelle filière industrielle, avec à la clé de nombreux emplois en France. Au total, le développement des véhicules électriques et hybride pourrait permettre de créer, en France, les emplois suivants :

Emplois créés suite au déploiement de 10 millions de véhicules électriques et hybrides

	Emplois mobilisés par an	
	hypothèse basse *	hypothèse haute *
Impact sur la construction automobile		
▪ Fabrication des véhicules électriques	-16 000	29 000
▪ Fabrication des véhicules hybrides	-18 000	31 000
Impact sur la filière énergie		
▪ Production d'électricité	29 000	36 000
▪ Production de biocarburants	21 000	21 000
▪ Perte d'activité sur les carburants pétroliers	-10 000	-10 000
Effets induits dans les services aux ménages		
▪ Commerce de proximité, école, services à la personne, services publics...	39 000	259 000
Total	44 000	366 000

* l'hypothèse basse correspond à une situation où un tiers environ de la fabrication d'éoliennes, de systèmes PV et de véhicules électriques et hybride est réalisé en France. Dans l'hypothèse haute, cette part se monte à deux tiers.

On peut estimer que le déploiement d'une flotte de dix millions de véhicules électriques et hybrides pourrait créer 200.000 emplois en France, qui correspond à une estimation médiane entre l'hypothèse basse et haute. Il y a donc un enjeu économique important à faire émerger ces nouvelles filières.

Le lieu où ces véhicules seront fabriqués est un facteur essentiel dans le résultat final. La première leçon est donc qu'il faudra être pragmatique et moduler les aides à l'acquisition de véhicules électriques et hybrides en fonction de notre compétitivité industrielle dans ce secteur. L'erreur stratégique faite sur les panneaux photovoltaïque ne doit pas être reproduite.

Toutefois, notre hypothèse basse, dans laquelle on suppose qu'une part importante de ces nouveaux véhicules est importée, semble montrer qu'il peut y avoir quand même un intérêt à diffuser ce type de véhicules en France. En effet, dans ce cas, le bénéfice économique sur la filière énergie demeure, et cette filière permet de créer de nombreux emplois.

Beaucoup des emplois créés sont à attendre des retombées économiques liées au renforcement de notre industrie. Chaque emploi créé dans une filière industrielle permet de maintenir 2 à 3 autres emplois dans les autres secteurs de l'économie (services à la personne notamment).

Si le CO2 est souvent mis en avant pour justifier une politique de soutien aux véhicules hybrides et électriques, on voit que l'argument économique est tout à fait significatif. Certains pourraient même considérer que l'avantage économique est même essentiel. Ainsi, le CO2 économisé par chaque véhicule électrique peut être valorisé à environ 1000 €¹. Pour valoriser le gain en emploi, notre estimation médiane montre que chaque véhicule électrique et hybride mis sur le marché permet de maintenir 0,25 emploi, un emploi « valant » plusieurs dizaines de milliers d'euros. Au-delà de cette comparaison délicate, il est important de

¹ Un véhicule thermique émet sur sa durée de vie environ 200.000 km x 0,13 kg CO2, soit 26 tonnes de CO2. Au prix de 50 € la tonne de CO2, cela fait 1300 €. Un véhicule électrique en France permet potentiellement de diminuer ces émissions par 80-90%.

(re)considérer les avantages sur l'économie, souvent mis au second plan, des véhicules électriques et hybrides.

La France s'est positionnée sur la filière véhicule électrique, notamment avec Renault qui est un des constructeurs qui a le plus investi sur cette technologie. Notre pays a par ailleurs un environnement favorable à l'émergence de cette technologie (faible contenu CO2 de l'électricité, faible coût de l'électricité...). Si ces avantages étaient confirmés, un déploiement de ces véhicules pourrait être une façon efficace de lutter à la fois contre les émissions de CO2 et de contribuer positivement à la vitalité de notre économie.

7. Annexes

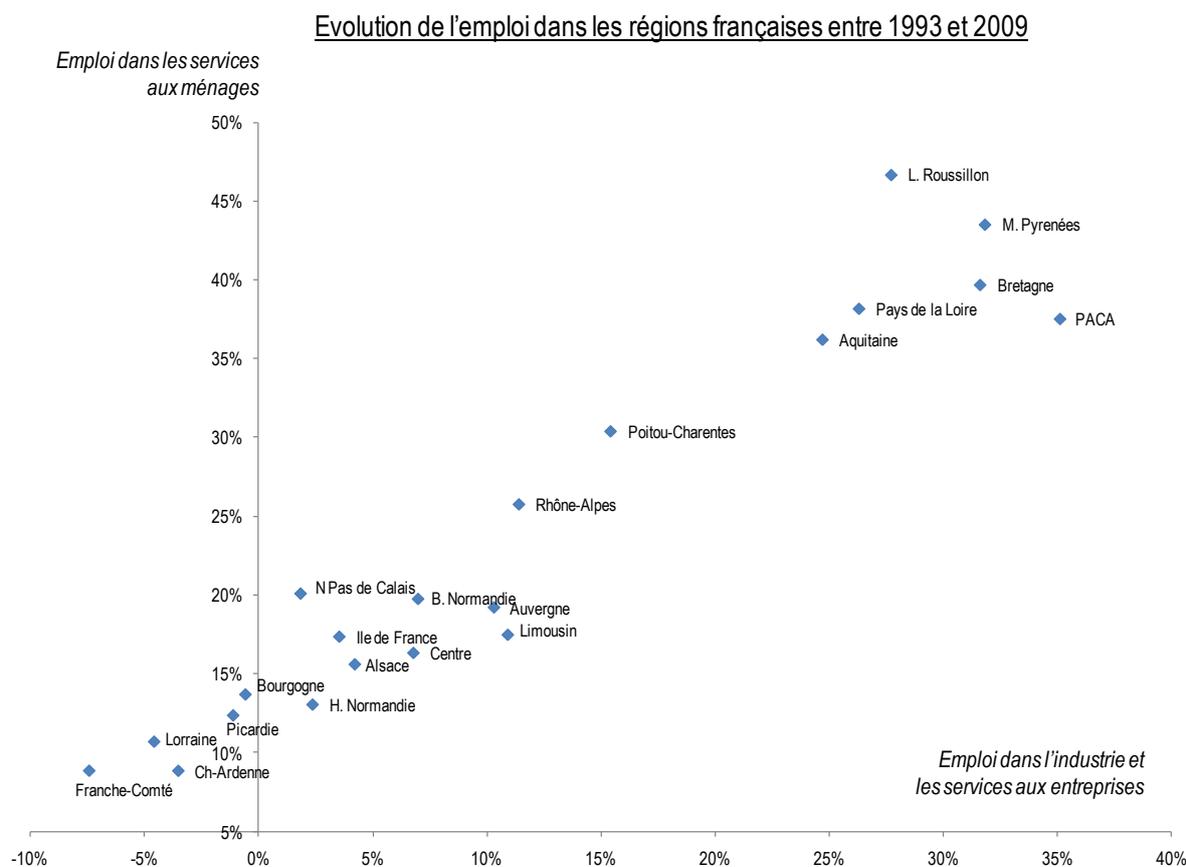
7.1. Annexe 1 : Lien statistique entre industrie et développement économique

L'industrie représente 13% de l'emploi, mais 80% des exportations et près de 90% des dépenses privées de R&D. Un grand nombre d'économistes considèrent que son poids dans l'économie est plus proche de 80% que de 16%.

L'analyse de l'emploi en France permet de démontrer que l'industrie est à l'origine du phénomène de création d'emploi en France. On observe notamment que quand l'emploi augmente fortement dans l'industrie, il augmente fortement dans les services aux ménages¹, et vice versa comme le montre le nuage de points sur les 22 régions françaises entre 1993 et 2009.

La région Midi-Pyrénées a par exemple réussi à augmenter son emploi industriel de 32% sur cette période, et l'emploi dans les services aux ménages a progressé quant à lui de 44%. A l'inverse, c'est dans la région Franche-Comté que l'évolution de l'emploi sur cette période est la plus faible de France, à la fois pour les emplois dans l'industrie ainsi que pour les emplois dans les services aux ménages.

Ces chiffres tendent à confirmer ce qu'un grand nombre d'économistes pensent, à savoir que l'industrie a un rôle moteur sur l'activité économique.



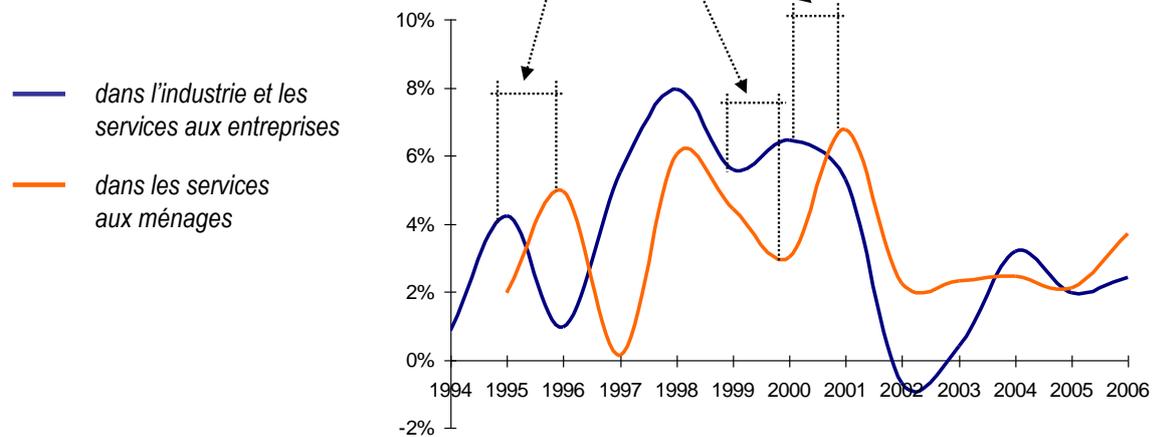
¹ Dans notre définition, l'industrie comprend outre les emplois dans le secteur industriel, les emplois dans un certain nombre de services aux entreprises (logistique, intérim, recherche et développement...). Les services aux ménages représentant quant à eux les commerces, les services domestiques et personnels (coiffure, garde d'enfants, ménage...), les emplois dans les domaines de la culture, du sport, les emplois associatifs... Certains emplois (BTP, emplois publics...) n'ont pas été pris en compte dans cette analyse car ils sont difficiles à classer.

Source : Données sur l'emploi Assédic. Graphique publiée par B. Bougnoux dans Alternatives Economiques.

L'exemple toulousain est particulièrement instructif car il permet d'indiquer le sens de causalité entre l'industrie et le développement des services aux ménages. Ce territoire a connu, au cours des dernières années, un investissement industriel très important sur le site d'Airbus à Blagnac. C'est un des territoires français qui a obtenu la plus forte progression de son activité industrielle, l'emploi y a cru de 54% entre 1993 et 2008. On observe dans les services à la personne une progression similaire (52%).

Sur ce territoire, on voit clairement que c'est l'emploi dans les services aux ménages qui s'est ajusté à l'emploi industriel, et non le contraire, avec en moyenne un retard d'une année. Ainsi, quand l'emploi industriel connaît une année un essor important, l'emploi dans les services aux ménages va, l'année suivante, connaître le même essor, et inversement.

Taux de croissance de l'emploi dans la région de Toulouse



Source : Données sur l'emploi Assédic. Graphique publiée dans Alternatives Economiques..

7.2. Annexe 2 : Comment remplacer la TIPP ?

La TIPP rapporte environ 25 milliards d'euros par an aux finances publiques, ce qui représente un peu moins de 5% des ressources de l'Etat. La TIPP est payée par les automobilistes lorsque ces derniers achètent de l'essence ou du diesel. C'est une taxe qui est donc fonction de l'usage du véhicule, plus on roule, plus on paye.

La TIPP permet de financer la construction et l'entretien des routes dans la mesure où leur usage est en grande partie gratuit. Une relative égalité des citoyens est assurée, puisque plus on utilise l'infrastructure routière, plus on paye de TIPP. Avec le véhicule électrique, l'Etat se priverait néanmoins de cette ressource financière, une compensation doit être trouvée.

Il ne semble pas possible de taxer l'électricité consommée dans le véhicule électrique car d'autres usages existent. On ne comprendrait pas qu'une taxe soit prélevée auprès d'un ménage se chauffant à l'électricité, et ceci dans le but de financer l'entretien des routes.

L'alternative pourrait être de réintroduire une sorte de vignette. Toutefois, celle-ci devrait être d'un montant très élevé si on veut qu'à terme elle se substitue intégralement à la TIPP. Pour atteindre une recette fiscale équivalente, soit 25 Md€, la vignette devrait en moyenne coûter

800 € par an et par voiture, ce qui semble politiquement difficile à mettre en place. En outre, cette solution présente le défaut de mettre tout le monde sur un pied d'égalité, alors que la TIPP actuelle est payée en fonction du kilométrage réalisé.

Une autre alternative serait d'instaurer le système actuellement en phase de déploiement pour les poids-lourds, c'est-à-dire une taxe assise sur les kilomètres réellement parcourus par les véhicules, dont le monitoring repose sur un dispositif de suivi par satellite.

Cette technologie est opérationnelle pour les poids-lourds, les allemands la testent notamment depuis plusieurs années, et la France va s'y mettre. Dans la phase transitoire, les véhicules électriques pourraient être exonérés de cette taxe, ce qui permettrait d'assoir leur compétitivité par rapport aux véhicules thermiques.

7.3. Annexe 3 : Quel contenu CO2 du km de la voiture électrique à terme

Aujourd'hui, le bon bilan CO2 du véhicule électrique repose sur une électricité d'origine nucléaire abondante. Si demain, le parc nucléaire régresse voire disparaît totalement, quel sera le nouveau contenu CO2 du véhicule électrique. Il pourrait rester assez bon, de l'ordre de 30 g CO2 par km, notamment grâce à l'essor des renouvelables. Cette note essaye d'expliquer pourquoi.

Dans de nombreux pays, on constate depuis une vingtaine d'année une augmentation importante de la part des énergies renouvelables, notamment du fait de l'éolien. C'est le cas de l'Allemagne, de l'Espagne, de l'Italie et du Danemark. Le Royaume-Uni a fait moins d'efforts, et la France se distingue par une quasi-stabilité de la part de ses ENR.

Part des renouvelables dans la production d'électricité

	1990	1995	2000	2005	2008	2009	2010
Allemagne	5%	7%	8%	12%	16%	19%	19%
France	14%	16%	14%	11%	14%	14%	15%
Espagne	18%	16%	17%	18%	21%	26%	33%
Italie	18%	19%	21%	19%	21%	26%	27%
Danemark	3%	6%	17%	29%	30%	30%	34%
Royaume-Uni	2%	3%	3%	6%	7%	8%	8%

Source : Enerdata

L'accroissement de la part des renouvelables a été rapide, et s'est même accéléré ces dernières années. Ces chiffres appuient l'idée que les renouvelables pourraient représenter 50% du mix électrique à un horizon de 20 ou 30 ans, et ceci pour plusieurs pays en Europe.

Dans ces conditions, quel sera le bilan CO2 du véhicule électrique dans un mix composé pour moitié de renouvelables et pour moitié de centrales fossiles ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire de raisonner par usage de consommation. Il faut notamment imaginer quels seront les usages qui permettront de gérer l'intermittence de l'électricité renouvelable. Le tableau suivant donne des indications sur ces possibilités.

Capacité des usages à absorber l'intermittence de l'électricité renouvelable

Résidentiel	Chauffage	Les logements très bien isolés pourraient plus ou moins s'accommoder avec l'intermittence des ENR
	Eau chaude	S'accommode bien avec l'intermittence des ENR
	Cuisson	S'accommode mal avec l'intermittence des ENR
	Electroménagers	Certains appareils s'accommodent bien avec l'intermittence des ENR (lave-vaisselle...), d'autres moins bien (TV...)
	Eclairage	S'accommode mal avec l'intermittence des ENR
Tertiaire	Hôpitaux, écoles...	S'accommode mal avec l'intermittence des ENR
Transport	Ferroviaire	S'accommode mal avec l'intermittence des ENR
	Voitures électriques	S'accommode bien avec l'intermittence des ENR
Industrie	Sidérurgie, chimie...	S'accommode partiellement avec l'intermittence des ENR

Les usages s'accommodant mal avec l'intermittence devraient donc principalement utiliser une électricité d'origine fossile. Parfois, la production des éoliennes arrive au « bon moment », aussi on peut considérer que ces usages utiliseront aussi une électricité renouvelable, pour une part secondaire mais néanmoins non négligeable.

Les usages s'accommodant bien avec l'intermittence pourraient s'approvisionner assez largement grâce à l'électricité renouvelable, par exemple à hauteur de 70-80%, contre 20-30% par une électricité d'origine fossile. Ces chiffres mériteraient une analyse fine, analyse qui n'est toutefois pas l'objet de la présente recherche.

Sur la base de ces premiers constats, établissons maintenant un bilan offre-demande d'électricité sur une année pleine, et regardons comment le réseau peut absorber la moitié d'énergie renouvelable et quelle place particulière pourrait avoir le véhicule électrique dans ce système.

Le bilan a été calé sur les chiffres 2010 de l'Allemagne, un des pays les plus en pointe en matière d'intégration des énergies renouvelables. Un poste, inexistant actuellement, a été ajouté à ce bilan pour représenter la consommation d'électricité d'une flotte de 10 millions de véhicules électriques. Un deuxième poste a été ajouté, représentant le besoin de stocker une partie de l'électricité.

Le nouveau bilan se présente comme suit, il montre qu'une partie des consommations finales pourraient absorber assez efficacement l'électricité intermittente du réseau, et qu'en conséquent on pourrait atteindre sur ce réseau un mix composé pour moitié d'électricité renouvelable.

Consommation d'électricité annuelle par usage et part des renouvelables

		Conso totale d'électricité	dont électricité renouvelable (en TWh et en %)	
Résidentiel	Chauffage	17,1 TWh	8,6 TWh	50%
	Eau chaude	22,6 TWh	18,0 TWh	70%
	Cuisson	11,9 TWh	2,4 TWh	20%
	Electroménagers	60,0 TWh	42,0 TWh	70%
	Eclairage	25,0 TWh	5,0 TWh	20%
Tertiaire	Hôpitaux, écoles...	80,3 TWh	16,1 TWh	20%
Transport	Ferroviaire	15,6 TWh	3,1 TWh	20%
	Voitures électriques	20,0 TWh	16 TWh	80%
Industrie	Sidérurgie, chimie...	204,7 TWh	81,9 TWh	40%
Ind. électrique	Stockage ENR		38 TWh	
Total		457 TWh	229 TWh	50 %

Source : Enerdata (bilan estimé calé sur un pays de la taille de l'Allemagne).

Les postes de consommation permettant de gérer l'intermittence sont principalement ceux ayant un ratio supérieur à 50% dans le tableau ci-dessus. Par exemple, on suppose que certains appareils électro-ménagers sont équipés de puce et se déclenchent aux moments le plus opportun, ce qui permet d'avoir 70% de la consommation de l'électro-ménager reposant sur une électricité renouvelable.

Le véhicule électrique est un des postes de consommation les plus flexibles. L'électricité d'origine renouvelable pourrait représenter 80% de l'alimentation de ces véhicules. Grâce aux batteries qu'elles embarquent, les véhicules auront en effet la possibilité de stocker l'électricité jusqu'à environ 4 jours d'utilisation (40 km par jour pour 160 km d'autonomie).

Durant cette période de 4 jours, la probabilité que les véhicules électriques soient en mesure de capter une énergie intermittente est assez grande. L'augmentation du nombre de sites éoliens dispersés sur le territoire devrait être favorable à la diminution de la volatilité de cette source d'énergie. Par ailleurs, une certaine complémentarité devrait également être trouvée avec l'énergie solaire, puisque les dépressions sont plutôt synonymes de vents et les anticyclones de soleil.

Après analyse des données de production éolienne sur une année complète, une trentaine de jours pourraient poser problème pour recharger les véhicules électriques, avec une situation de « panne » de vent. Pour ces jours, il faudra a priori recharger les véhicules avec une électricité d'origine fossile.

Pour gérer les tensions qui pourraient apparaître, une sécurité devra être apportée au réseau. Un stockage d'électricité a été envisagé dans le bilan présenté ci-dessus. Ce stockage pourra reposer sur des stations de pompage, des batteries, ou encore d'autres technologies. Dans le bilan ci-dessus, le besoin de stockage est assez limité puisqu'il représente 38 TWh sur 457 TWh.

Les émissions de CO₂ d'un véhicule électrique dont le réseau serait, peu ou prou, dans cette situation peuvent maintenant être calculées¹. Pour 80% des km réalisés, le véhicule utilise une électricité ayant un bilan CO₂ proche de zéro. Pour 20%, il utilise des centrales fossiles produisant environ 600 grammes de CO₂ par KWh. En moyenne, ce véhicule émet donc 120 g CO₂ par KWh consommé. Comme chaque KWh permet de parcourir 4 km environ, le bilan CO₂ de cette voiture électrique est donc de 30 g CO₂ / km. Notons que ce bilan CO₂ a été obtenu sans avoir recouru à une électricité d'origine nucléaire.

7.4. Annexe 4 : Part des énergies fossiles dans notre balance commerciale

Les énergies fossiles représentent un poste important dans nos échanges commerciaux. En 2010, le pétrole était le deuxième produit importé en valeur monétaire, les produits pétroliers raffinés le quatrième et le gaz naturel le sixième. Ces trois postes représentent un coût de presque 48 Md€, soit plus des deux tiers de notre déficit commercial. En outre, L'importance du pétrole et du gaz dans le solde extérieur est en croissance régulière depuis plusieurs années. En 2011, le pétrole devrait passer devant l'automobile et être le premier produit importé en valeur monétaire.

Principales importations en France en 2010

	Importations	Exportations	Solde
1 - Véhicules automobiles	30,6 Md€	23,6 Md€	-7,0 Md€
2 - Pétrole brut	26,7 Md€	0,1 Md€	-26,7 Md€
3 - Aéronefs et engins spatiaux	23,8 Md€	41,9 Md€	18,1 Md€
4 - Produits du raffinage du pétrole	19,9 Md€	10,2 Md€	-9,7 Md€
5 - Préparations pharmaceutiques	17,7 Md€	24,8 Md€	7,1 Md€
6 - Gaz naturel, liquéfié ou gazeux	12,4 Md€	1,2 Md€	-11,3 Md€
7 - Ordinateurs et équipements périphériques	10,5 Md€	3,7 Md€	-6,7 Md€
8 - Accessoires pour véhicules automobiles	9,4 Md€	13,0 Md€	3,6 Md€
9 - Produits chimiques organiques de base	9,4 Md€	9,7 Md€	0,3 Md€
10 - Produits sidérurgiques de base	8,9 Md€	9,5 Md€	0,6 Md€
...
Total	455,9 Md€	388,5 Md€	-67,4 Md€

Source : Douanes

¹ Les émissions liées à la fabrication du véhicule, notamment des batteries, ne sont pas prises en compte.